

Le frottement statique : analyse des raisonnements des étudiants

Static friction : students' ways of reasoning

Helena CALDAS

Departamento de Física-CCE
UFES-Universidade Federal do E.S.
29069 Vitória, E.S. Brésil.

Édith SALTIEL

Laboratoire de Didactique des Sciences Physiques
Université Denis Diderot - Paris 7
Case courrier 7086, 2 place Jussieu
75251 Paris cedex 05, France.

Résumé

Le travail présenté étudie les modes de raisonnement des étudiants confrontés à des situations de frottement statique. Les caractéristiques principales de ces raisonnements sont décrites, analysées et sont comparées à celles observées précédemment à l'occasion de situations de frottement cinétique. Sont enfin évoquées des suggestions pédagogiques et des perspectives de recherche.

Mots clés : *raisonnement, frottement statique, frottement solide sec, mécanique, enseignement.*

Summary

This paper presents work on ways of reasoning that students use when confronted to physical situations of static friction. The principal characteristics of these type of reasoning will be described, analysed and compared with those observed in situations of kinetic friction. Some pedagogical and research perspectives are mentioned.

Key words : *reasoning, static friction, dry friction, mechanics, teaching.*

Resumen

El trabajo presentado estudia los modos de razonamiento de los estudiantes confrontados a situaciones de frotamiento estático. Las características principales de estos razonamientos son descritas, analizadas y comparadas con las observadas anteriormente en situaciones de frotamiento cinético. Finalmente se presentan sugerencias pedagógicas y algunas perspectivas de investigación.

Palabras claves : *razonamiento, frotamiento estático, frotamiento sólido seco, mecánica, enseñanza.*

INTRODUCTION

Dans un précédent article (Caldas & Saltiel, 1995), ont été décrits les raisonnements des étudiants lorsqu'ils étaient confrontés à des situations physiques de frottement cinétique. Nous avons montré que tout se passe comme si le raisonnement des étudiants s'appuyait sur les éléments suivants :

- une force de frottement est, pour la grande majorité des étudiants, une force qui s'oppose au mouvement (certains allant jusqu'à écrire que « *La force de frottement s'oppose au mouvement du bloc **par définition*** » ;
- à une interaction de contact correspond, pour les étudiants, une seule force (et non deux, c'est-à-dire une sur chacun des objets qui sont en contact). De plus, cette force « unique » de contact n'agit, pour les étudiants, que sur un seul objet. Dans les situations de frottement cinétique étudiées, les deux objets en contact étaient situés l'un au-dessus de l'autre et la force unique agissait sur l'objet qui se trouvait au-dessus de l'interface de contact.

Depuis, d'autres situations ont été étudiées (en particulier des situations où les surfaces en contact sont verticales) et les résultats (Besson,

1997) obtenus montrent que, pour les étudiants, il n'y a toujours qu'une seule force de frottement qui s'exerce sur un seul objet (en général, celui sur lequel un agent extérieur agit). L'objet sur lequel aucune force de frottement ne s'exerce est déclaré être entraîné par frottement.

Lorsqu'il y a frottement cinétique, il y a glissement et donc une vitesse relative de glissement. Dans ce cas, le sens de la force de frottement est lié au sens de cette vitesse relative. Or, lors de notre étude sur le frottement cinétique, nous avons constaté que les étudiants ne déterminaient pas le sens d'une force de frottement à l'aide de cette vitesse relative de glissement. Il nous a semblé intéressant de regarder ce que faisaient les étudiants lorsqu'ils étaient amenés à résoudre des problèmes de frottement statique : quel(s) mouvement(s) privilégieraient-ils ? Raisonneraient-ils comme pour les situations de frottement cinétique ?

Par ailleurs, au lycée, la distinction entre frottement cinétique et frottement statique, lorsqu'elle existe, est très sommaire. Il en est de même dans la plupart des cours de mécanique de première année d'Université, à l'exception des cours spécialisés de mécanique du solide. Les exemples choisis dans l'enseignement étaient, jusqu'aux modifications des programmes français en 1993, dans la grande majorité des cas, des exemples où ces forces sont des forces résistantes qui s'opposent au mouvement, des forces qui freinent (Caldas, 1994). L'idée principale transmise par l'enseignement de la physique est cette idée de freinage, de phénomène résistant et non de phénomène pouvant être à l'origine du mouvement d'un objet. Prenons un exemple : pour une voiture, on lit fréquemment, dans les manuels, que « *le couple moteur sert à vaincre le frottement* » et exceptionnellement « *c'est la force de frottement qui permet à la voiture d'avancer* ». Les étudiants différencient-ils ces deux types de frottement ?

1. QUELQUES RAPPELS SUR LES LOIS DU FROTTEMENT STATIQUE OU FROTTEMENT DE NON GLISSEMENT

Rappelons tout d'abord que le frottement statique, tout comme le frottement cinétique, ne se manifeste qu'à partir du moment où une force extérieure au système physique considéré lui est appliquée. Si cette condition n'est pas remplie, il n'existe aucun frottement entre les solides en contact ; dans ce cas, les résultantes des actions de contact sont normales à chacune des surfaces en contact et les composantes tangentielles de ces résultantes (appelées habituellement forces de frottement) exercées sur chacune de ces surfaces sont nulles.

De façon générale, il y a frottement statique lorsque la **vitesse relative de glissement** des points (lignes ou surfaces) des solides en contact **est nulle**.

La force de contact, lorsqu'il y a un frottement statique, est contenue à l'intérieur d'un cône de demi-angle au sommet α_s donné par l'expression

$$\operatorname{tg} \alpha_s = \mu_s = \frac{|\vec{f}_s|_{\max}}{|\vec{N}|}$$

où μ_s est le coefficient de frottement statique qui est toujours supérieur à μ_c (coefficient de frottement cinétique), et N la norme de la composante normale de la résultante des actions de contact. Cette expression donne la valeur maximum que peut prendre la norme de cette force, ce qui correspond au cas où le mouvement relatif entre les points, lignes ou surfaces en contact est imminent. À part ce cas extrême, la norme de cette force est *a priori* totalement inconnue et varie entre 0 et $f_{s\max}$. Par ailleurs, le sens de la composante tangentielle de cette force de frottement, contrairement à celle du frottement cinétique, ne peut pas être défini à l'aide de la vitesse relative de glissement puisque cette dernière est nulle. De plus, la seule donnée des différents mouvements des solides en contact ne permet pas de connaître le sens de cette force : il est, tout autant que la norme, inconnu *a priori*, contrairement à ce qui se passe pour les forces de frottement cinétique. En effet, les forces de frottement statique sont orientées de telle sorte qu'elles s'opposent toujours à cet éventuel glissement relatif (en absence de frottement). Il existe des situations physiques pour lesquelles il est facile de prévoir qualitativement le sens du mouvement de glissement relatif en absence de frottement et donc d'en déduire les sens des forces de frottement statique ; mais ce n'est pas toujours le cas. On est alors obligé d'avoir recours aux équations dynamiques, supposer un sens arbitraire pour la force de frottement et trouver, par le calcul, le sens de cette force.

Depuis quelques années, on trouve dans la littérature des articles sur la tribologie : Barquins (1991), Bowden & Tabor (1959) et Baumberger et al. (1994). Il ressort de ces études que les coefficients de frottement statique et cinétique dépendent très peu de la nature des surfaces de contact, tant que l'on reste dans des conditions de frottement sec, c'est-à-dire sans lubrification. Le contact « réel » entre deux surfaces planes est constitué d'un grand nombre de micro-contacts dont l'aire totale est très inférieure à l'aire apparente de contact, micro-contacts essentiellement dus au fait que les surfaces en regard présentent des aspérités. Bowden & Tabor ont montré le rôle important joué par l'état mécanique de déformation des aspérités. Les contraintes locales au niveau des contacts jouent un rôle essentiel : les contraintes locales, sources des forces de frottement, sont générées par le déplacement microscopique relatif local des contacts (les micro-contacts sont déformés tout d'abord élastiquement puis plastiquement, sur une

distance de l'ordre du micron, avant de rompre). En s'opposant toujours à ce déplacement local, elles peuvent être soit créatrices de mouvement de l'objet étudié soit résistantes. Le gros problème est d'avoir des informations sur ces déplacements relatifs locaux, pour en déduire ensuite des informations sur les forces de frottement.

2. LE FROTTEMENT STATIQUE ET LES ÉTUDIANTS

Le frottement statique est peu étudié en tant que tel dans l'enseignement général. Lorsque c'est le cas, la majorité des exemples étudiés concerne des objets sur lesquels on exerce une force et qui restent immobiles à cause du frottement statique. Les solides étudiés sont toujours au repos par rapport au support sur lesquels ils reposent (d'où le terme de statique, sans doute) : une armoire que l'on veut déplacer en la poussant et qui ne bouge pas, un bateau en équilibre sur un plan incliné, un crayon qui reste immobile sur un cahier que l'on déplace, etc.

Hélène Richoux (1996) a proposé à 130 étudiants (76 étudiants de première année d'université et 54 lycéens de 1^{ère} scientifique (17-19ans), tous ayant étudié la mécanique) des situations de frottement statique mettant en jeu, comme pour le frottement cinétique, des mouvements de translation afin de voir si, en changeant la nature du frottement, les réponses changeaient (un énoncé de ces questionnaires est donné en annexe). Hélène Richoux a constaté que les étudiants et les lycéens répondaient de la même façon à ces questionnaires, justifiant leur réponse en déclarant que « *la force de frottement s'opposait au mouvement de l'objet* », tout comme les étudiants qui ont été confrontés à des situations de frottement cinétique. Les réponses fournies à la dernière question du questionnaire sont assez illustratives puisque, pour la majorité des étudiants, passer d'un frottement statique à un frottement cinétique ne change rien.

Cependant, il y a d'autres situations de frottement statique, celles pour lesquelles le solide étudié est en mouvement par rapport au support avec lequel il est en contact : ce sont toutes les situations **de roulement sans glissement**, puisque roulement sans glissement signifie vitesse relative de glissement au contact nulle. Il se trouve que ces situations sont non seulement très quotidiennes (puisque tout ce qui roule avance, en première approximation, grâce à ce type de frottement), mais aussi très étudiées dans l'enseignement, même si les manuels ne parlent pas de situations de frottement statique à leur sujet. Ce sont de telles situations que nous avons étudiées, c'est-à-dire des situations pour lesquelles la vitesse relative de glissement est bien nulle alors que l'objet qui roule sans glisser a un mouvement tout à fait observable.

2.1. Le questionnaire de la voiture (V_1)

Nous avons donc voulu voir si, pour les étudiants, les forces de frottement statique peuvent aussi bien provoquer un mouvement que le freiner et si elles sont déterminées par le seul mouvement observé du solide sur lequel elles agissent.

Le mobile étudié est une voiture qui a ses roues motrices à l'avant. Cette voiture est arrêtée sur une route horizontale et il est demandé de dessiner les forces de frottement qui s'exercent sur les roues motrices de la voiture dans deux cas différents : dans le premier cas (cas A), la voiture est en panne et son conducteur la pousse ; dans le deuxième (cas B), la voiture n'est plus en panne, le conducteur monte dans sa voiture, met le contact et démarre. L'énoncé se trouve dans l'encadré 1.

ENCADRÉ 1

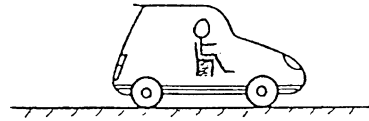
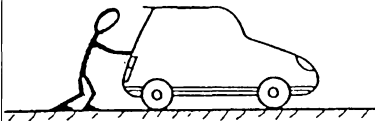
Une voiture ayant ses roues motrices à l'avant, se trouve sur une route horizontale dont la surface est rugueuse. On veut étudier les forces en jeu dans les deux situations suivantes :

cas A : la voiture, en panne, est poussée par son conducteur ;

cas B : le conducteur entre dans la voiture en état de marche, met le contact et démarre (on supposera que les roues de la voiture roulent sans glisser).

A (voiture en panne)

B (voiture en état de marche)



Dessiner sur chacun des schémas les forces de frottement exercées par le sol sur les roues avant de la voiture. Préciser, dans chaque cas, le sens de ces forces par rapport au sens du mouvement de la voiture. Justifier votre réponse.

Ces deux situations sont tout à fait classiques ; en revanche, il est moins habituel de les présenter en même temps. Lorsque la voiture est poussée, il y a deux forces que « l'extérieur » exerce sur la voiture, la force que le conducteur exerce sur elle quand il la pousse (force supposée passer par l'axe des roues) et la force que le sol exerce sur les roues, force dont la composante tangentielle est en sens contraire de celui du mouvement de

translation de la voiture. En revanche, lorsque la voiture démarre, la seule force extérieure à la voiture est une force que le sol exerce sur les roues motrices, force dont la composante tangentielle est de même sens que celui du mouvement de translation de la voiture. Les sens des forces de frottement statique diffèrent d'une situation à l'autre (alors que le mouvement de translation du centre de masse de la voiture et le sens de rotation des roues sont les mêmes dans les deux situations) car les forces qui s'exercent sur la voiture sont différentes et créent au niveau des contacts des déplacements microscopiques relatifs locaux différents, et donc des forces de frottement différentes.

Cent vingt quatre personnes ont été interrogées, dont 24 étudiants français de sciences physiques de troisième année de l'université Paris 7, 18 étudiants français (18-20 ans) de terminale D (spécialité sciences de la vie et de la Terre), 33 étudiants brésiliens de première année de l'université de Vitoria (sections de génie électrique et mécanique) et 49 professeurs espagnols de sciences physiques de lycée de la région de Valencia, dont 38 en stage de formation continue. Bien que la population interrogée soit très hétérogène, tous ont étudié les lois de Newton et ont eu à traiter des problèmes de physique dans lesquels les frottements n'étaient pas négligés. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant.

Questionnaire	A1 (voiture) N = 124			
	Licence	Term D	Brésil	Espagne
Population	N = 24	N = 18	N = 33	N = 49
Sens de f le même dans les deux cas Cas A ← et Cas B ← ou Cas A → et Cas B →	92 %	72,5 %	76 %	84 %
Sens de f différent dans les deux cas ← (cas A) et (cas B) →	4 %	16,5 %	18 %	8 %
Pas de réponse ou réponse inclassable	4 %	11 %	6 %	8 %

Tableau 1: **Sens des forces de frottement**

Les résultats diffèrent peu d'une population à l'autre : la majorité (et ceci quel que soit le niveau d'études des étudiants) trace des forces de frottement qui ont le même sens dans les deux situations physiques proposées. Ce sens « unique » est soit celui du déplacement du centre de masse du solide étudié, soit le sens contraire, comme l'indique le tableau 2 dans lequel nous avons regroupé toutes les réponses.

Questionnaire / Population		A ₁ (voiture) N = 124
Force de frottement s'oppose au mouvement (total : 81,5 %)	de translation de la voiture f vers la gauche ←	55,5 %
	de rotation des roues f vers la droite →	26 %

Tableau 2 : **Sens des forces de frottement lorsqu'il est identique dans les deux cas**

Pour ces étudiants, la force de frottement s'oppose toujours à l'un des mouvements des solides. Les justifications données par les étudiants se partagent de la façon suivante :

– a) le mouvement de référence considéré est, dans les deux cas, celui de translation de la voiture : les étudiants dessinent les forces de frottement toujours vers « la gauche » et déclarent que les forces de frottement **s'opposent toujours au mouvement de translation** de la voiture, ainsi que l'indiquent ces citations.

« Si la voiture est en panne ou en état de marche, les forces de frottement seront identiques dans le cas où la voiture doit avancer dans la même direction et dans le même sens. Les forces de frottement s'opposent au déplacement, donc elles sont en sens opposé au mouvement de la voiture. »

« Les forces de frottement freinent le mouvement ; elles sont donc en sens inverse du mouvement dans les deux cas. »

« Les forces de frottement sont des forces résistantes. Leur sens est donc toujours opposé à celui du mouvement. » ;

– b) le mouvement de référence considéré est celui de la rotation des roues de la voiture : les étudiants dessinent les forces de frottement toujours orientées vers « la droite » et déclarent que, dans les deux cas, les forces de frottement **s'opposent toujours au mouvement de rotation** des roues.

« Les forces de frottement s'opposent au glissement donc elles ont pour effet d'inverser le sens de rotation de la roue sur le sol. »

glissement



« Les forces de frottement s'opposent au mouvement de rotation des roues. »

« Quelle que soit la façon dont la voiture avance, les frottements sont les mêmes en direction et sens : opposés au mouvement de rotation. »

Ainsi, pour une écrasante majorité de la population interrogée :

– le sens de la force de frottement statique exercée sur un solide est déterminé à l'aide de la donnée du sens d'un mouvement observé du solide étudié ;

– le sens de la force de frottement statique exercée sur un solide s'oppose toujours au sens du mouvement observé du solide considéré (pour les deux situations étudiées, les étudiants prennent en compte soit le seul mouvement de rotation du solide soit le seul mouvement de translation de son centre de masse).

Une très faible minorité de la population (11,5 %) accepte l'idée que des forces de frottement puissent avoir des sens différents, alors que le mouvement observé du solide étudié ne change pas. La difficulté ici est de reconnaître qu'un même mouvement puisse avoir des causes différentes. Parmi la population qui a justifié les réponses (8,5 %), les justifications fournies sont de deux types :

– pour 3 %, la force de frottement s'oppose au mouvement de translation de la voiture dans le cas A (voiture en panne) et au mouvement de rotation des roues dans le cas B (voiture qui démarre) :

« Cas A : la force de frottement s'oppose au déplacement de la voiture. Cas B : la force de frottement s'oppose au déplacement des roues. »

Aucun de ces étudiants n'explique pourquoi la force de frottement s'oppose, dans un cas, au déplacement de la voiture et, dans l'autre, au mouvement de rotation des roues, alors que, dans les deux situations, les roues tournent toujours dans le même sens et le centre de masse de la voiture se déplace toujours dans le même sens ;

– les 5,5 % restant écrivent :

« Cas A : les roues ne sont pas motrices : frottement en sens inverse de la marche de la roue. Cas B : les roues sont motrices, les frottements sont vers l'avant car sinon les roues patineraient s'il n'y avait pas de frottement. »

« Cas A : pas de patinage car le conducteur pousse. Cas B : la roue tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. Donc, pour que la roue ne patine pas, il faut que la force de frottement soit en sens identique à celui de la marche de la voiture ».

Pour certains, le rôle moteur des roues et/ou leur éventuel patinage est déterminant pour justifier le sens différent attribué aux forces de frottement. Ces étudiants envisagent donc le cas où il n'y aurait pas de frottement pour déterminer le sens de la force de frottement : on peut, en effet, chercher le mouvement qu'aurait la voiture en absence de frottement, et en déduire ainsi le sens de la force de frottement sachant que cette dernière s'oppose à la tendance au glissement ainsi déterminé. Dans notre cas, s'il n'y avait pas de frottement, la voiture poussée aurait un mouvement de translation, les roues ne tournant pas (la voiture glisserait) et, dans le cas B, elle ne se translaterait pas, les roues tournant « dans le vide » (la voiture patinerait).

2.2. Le questionnaire de la sphère (V_2)

Pour ce questionnaire, nous nous sommes inspirées d'une situation physique de frottement statique proposée par Donald E. Shaw (1979) qui fait rouler sans glisser un cylindre sur une table en modifiant le point d'application de la force extérieure appliquée. D.E. Shaw montre expérimentalement que, le mouvement de translation du centre de masse du cylindre restant toujours de même sens, la force de frottement qui s'exerce sur le cylindre change de norme et de sens selon le moment de la force appliquée, c'est-à-dire selon la position, par rapport à l'axe du cylindre, du point d'application de la force extérieure. L'auteur déclare que ses étudiants ont été très étonnés par les résultats obtenus.

Ce type de situation nous a semblé intéressant à étudier car il montre bien que le sens d'une force de frottement statique ne dépend pas du sens de déplacement de l'objet sur lequel elle agit : ce sens *a priori* « inconnu » dépend des forces et couples extérieurs qui créent des déplacements microscopiques relatifs locaux. Une situation similaire avec une sphère a été proposée à des étudiants de deuxième année d'université ayant étudié la mécanique du solide et, en particulier, le frottement statique ainsi que la notion de vitesse relative de glissement. La situation proposée est celle d'une sphère sur laquelle un expérimentateur imaginaire exerce une force, constante en norme et sens, dans plusieurs cas, chaque cas différant par le point d'application de cette force. L'énoncé donne des résultats obtenus par un étudiant fictif pour chaque point d'application de la force extérieure. Ces résultats indiquent que la norme et le sens de la force de frottement qui s'exerce sur la sphère changent avec le point d'application de la force exercée par l'expérimentateur, alors que la sphère roule toujours sans glisser et dans la même direction. Les personnes interrogées doivent dire si ce qui est affirmé dans l'énoncé par cet étudiant fictif est sérieux ou farfelu, en justifiant leurs réponses. L'objectif de ce questionnaire n'est pas d'exiger

des étudiants une résolution mathématique et complète du problème (bien qu'ils aient tous les connaissances nécessaires pour le faire), mais seulement de dire si les résultats proposés dans le questionnaire (alors que le sens du mouvement du mobile ne change pas, la force de frottement change au départ de norme et de sens, avec le point d'application de la force extérieure) sont possibles ou non. La réponse correcte attendue suppose que le lecteur sache qu'il n'est pas possible de déduire le sens et la norme d'une force de frottement statique du sens de déplacement de l'objet sur lequel elle s'exerce mais qu'elle dépend du point d'application de la force extérieure puisque les rapports entre les moments de la force extérieure et de la force de frottement vont également varier.

Quarante huit étudiants ont été interrogés dont 24 sont des étudiants français de deuxième année de DEUG scientifique, spécialité sciences physiques (Paris 7), 12 des étudiants brésiliens de deuxième année de l'université de Sao Paulo (sections de génie électrique et mécanique) et 12 des étudiants brésiliens de première année de l'université de Vitoria, appartenant aux mêmes sections que les étudiants précédents.

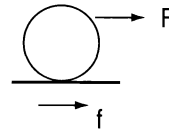
Là encore, la population semble hétérogène, mais tous ces étudiants ont suivi des enseignements de mécanique du solide équivalents (Caldas, 1994). Les résultats sont éloquentes : **aucun** étudiant n'accepte l'idée que le sens de cette force puisse changer alors que le sens du mouvement de translation du centre de masse de la sphère ne change pas (justification donnée par 35,5 % des étudiants) ou que le sens du mouvement de rotation de la sphère ne change pas (justification donnée par 46 % des étudiants), comme l'indiquent ces citations. Pour tous ces étudiants (81,5 %), le sens de la force de frottement s'oppose toujours au sens du mouvement considéré (soit le sens de la translation du centre de masse, soit celui du mouvement de rotation au contact).

« Non, la force de frottement ne peut pas changer de sens ; s'il y a un frottement entre la surface et un point de la sphère en contact, il sera toujours opposé au mouvement du centre de masse. »

« Dès que la sphère se déplace toujours vers l'avant, la réaction du plan de contact sera toujours en sens opposé donc la force de frottement ne pourra pas changer de sens. »

« La force de frottement seulement changera de sens quand la force F appliquée changera aussi de sens. Les différents points d'application de F ne changent en rien le sens de la force de frottement. Cette force sera toujours opposée au mouvement vers l'avant de la sphère. »

« La force de frottement a la caractéristique de s'opposer à la tendance au mouvement. Ainsi quand la sphère est tirée vers la droite, elle «pousse» le sol vers la gauche et il apparaît, par conséquent, une force de frottement vers la droite. »



Il ressort de ces résultats que les étudiants n'acceptent pas l'idée qu'une force de frottement statique, dans un roulement sans glissement, puisse changer de sens, voire s'annuler, sans que le sens du déplacement de l'objet considéré change.

3. DISCUSSION

Les tableaux 3 et 4 regroupent les réponses fournies aux questions des questionnaires de la sphère et de la voiture qui concernent le sens de la force de frottement statique par rapport à celui du mouvement du mobile étudié, quel que soit le mouvement considéré par l'étudiant : le mouvement de rotation (au contact) de la sphère ou des roues de la voiture ou le mouvement de translation de la sphère ou de la voiture.

Sens de la force de frottement statique	Questionnaire de la sphère N = 48	Questionnaire de la voiture N = 124		Total N = 172
		Étudiants	Professeurs	
La force de frottement s'oppose au mouvement.	81,5 %	80 %	84 %	81,5 %
La force de frottement est de même sens que le mouvement.	0 %	13,5 %	8 %	8 %
Aucune réponse ou réponse inclassable.	18,5 %	6,5 %	8 %	10,5 %

Taleau 3 : **Sens de la force de frottement par rapport au sens du mouvement considéré**

Il est possible de regarder les résultats précédents sous un angle différent : pour un mouvement du solide considéré par les étudiants, le sens de la force de frottement statique est-il toujours parfaitement connu ou peut-il changer selon les forces en jeu ? C'est ce qui a été mis en évidence dans le tableau 4, où nous avons réuni les réponses fournies par les professeurs et les étudiants.

Sens de la force de frottement	Questionnaire de la sphère N=48	Questionnaire de la voiture N=124	Total N=172
Sens de la force toujours le même.	81,5 %	81,5 %	81,5 %
Sens de la force peut changer.	0 %	11,5 %	8 %
Aucune réponse ou réponse inclassable.	18,5 %	7 %	10,5 %

Tableau 4 : Le sens de la force de frottement peut-il changer ?

La force de frottement statique (soit pour le roulement sans glissement, soit pour la translation) est, pour la grande majorité de la population interrogée, une force qui a un sens que l'on connaît dès lors que le sens de déplacement de l'objet sur lequel elle agit est connu : elle s'oppose toujours au mouvement « observé » (« effectif », « donné ») du solide considéré (sans aucune référence à l'éventuel mouvement de glissement relatif des surfaces en contact, en l'absence de frottement, et encore moins de la prise en compte des déplacements relatifs locaux). La minorité restante se comporte différemment selon le questionnaire (cf. les deux dernières lignes du tableau 4), la situation de la sphère étant beaucoup plus difficile à analyser qualitativement que celle de la voiture.

Ces résultats, qui rejoignent ceux obtenus pour le frottement cinétique (Caldas & Saltiel, 1995), peuvent se résumer ainsi :

- une écrasante majorité considère que les forces de frottement statique ont un sens qui dépend du sens du mouvement donné du solide étudié ;
- le sens attribué à cette force de frottement statique est toujours opposé à celui du mouvement donné ou observé du solide, le mouvement de référence considéré (dans le cas du roulement sans glissement) pouvant être aussi bien le mouvement de translation du centre de masse que celui de la rotation autour du centre de masse.

Il ressort que la force de frottement statique n'est nullement perçue comme une force qui peut **dépendre** des conditions dynamiques de chaque situation physique et dont le sens n'est pas connu ou déterminé à l'aide de la seule donnée des mouvements effectifs des solides en présence. De ce point de vue, il semble que les étudiants appliquent les lois du frottement cinétique au cas du frottement statique, comme s'il existait (au moins lorsque les solides sont mobiles dans un référentiel donné) un phénomène unique de frottement entre les solides en contact.

4. SUGGESTIONS PÉDAGOGIQUES – CONCLUSION

Les phénomènes de frottement intervenant sans cesse dans notre vie quotidienne, il paraît souhaitable d'en parler dans l'enseignement. Cependant, les objectifs de l'enseignement dépendent bien sûr de la nature du message que nous voulons faire passer et du public auquel on s'adresse. Il est possible, dans un premier temps, d'uniformiser le vocabulaire en appelant, force de frottement, la composante tangentielle de la force de contact, que cette composante soit résistante ou motrice. Il est fréquent, en effet, de rencontrer dans des manuels qui étudient le problème de la voiture deux termes différents pour la force tangentielle : elle est appelée force motrice lorsqu'elle est dans le même sens que le mouvement de la voiture et force de frottement lorsqu'elle est de sens contraire à celui du mouvement ! De même, il est fréquent de trouver des exercices où il est demandé de calculer «la force motrice» d'une voiture, alors que les frottements sont négligés, ce qui suggère qu'une voiture (comprenant carrosserie, moteur, roues, conducteur, etc.) qui démarre est soumise **de la part de l'extérieur** à une « force motrice développée » par le moteur de la voiture ! Par conséquent, il n'est pas inutile de montrer qu'une force de frottement ne se réduit pas à une unique force de freinage et qu'elle peut être à l'origine d'un mouvement. En revanche, il est également utile de montrer que, malgré cette propriété de freinage ou de propulsion, cette force s'oppose à des déplacements relatifs locaux : cette approche aidera peut-être les étudiants à traiter de problèmes d'énergie lorsqu'il y a des frottements ; mais ceci est une autre histoire.

Compte tenu des difficultés connues à ce jour lors de cette étude (et de celle sur le frottement cinétique) nous pouvons isoler quelques points essentiels sur lesquels il est souhaitable d'insister quand on enseigne ce phénomène.

1) Les lois de Newton : les forces de frottement exercées sur les solides en contact sont des forces comme les autres vis à vis des lois de Newton. En ce qui concerne, en particulier, la loi des actions réciproques, à un contact donné correspondent **deux forces** : les résultantes des actions de contact s'exercent ainsi sur **chacun des solides** concernés. Des schémas éclatés préconisés par Viennot (1996) participent à aider les étudiants à maîtriser ce problème ;

2) Vitesse relative de glissement : savoir reconnaître parmi toutes les situations où des solides se déplacent dans un référentiel donné celles pour lesquelles la vitesse relative de glissement au contact d'un solide par rapport à l'autre est nulle, en particulier, reconnaître qu'il existe des situations de « mouvement », pour lesquelles cette vitesse est nulle.

3) Frottement solide et vitesse relative de glissement

Frottement statique : associer ce phénomène à des situations physiques pour lesquelles la vitesse relative de glissement des zones de contact les unes par rapport aux autres est **nulle**, à condition qu'une force extérieure soit exercée sur l'un des solides en jeu.

Frottement cinétique : associer ce phénomène à des situations où obligatoirement la vitesse relative de glissement au contact n'est pas nulle ;

4) Les lois du frottement solide sec : les lois macroscopiques, pour ces deux types de frottement, sont différentes. Les forces de frottement cinétique exercées sur chaque surface de contact sont parfaitement définies en norme et sens alors que les forces de frottement statique sont inconnues *a priori*. Ces dernières, en s'opposant aux déplacements relatifs locaux au niveau du contact, ne dépendent que des autres forces en jeu : le sens de ces forces, contrairement aux forces de frottement cinétique, ne peut pas être déterminé à l'aide de la seule donnée des mouvements effectifs, observés, des solides considérés ;

5) Forces de frottement, forces résistantes ou propulsives ?

Les forces de frottement, par définition, ne s'opposent pas au « mouvement » : elles s'opposent, soit au mouvement relatif de glissement au contact des solides les uns par rapport aux autres (frottement cinétique), soit à l'éventuel mouvement de glissement relatif des solides les uns par rapport aux autres qui se produirait en absence de frottement (frottement statique). Cependant, pour les deux types de frottement, une force de frottement s'exerçant sur un objet s'oppose toujours aux déplacements relatifs locaux (Baumberger et al., 1994). Ainsi, ces forces peuvent toutes les deux avoir un rôle de **force** motrice ou de propulsion.

Tous ces points ne peuvent évidemment être développés à n'importe quel niveau d'étude : les premier et dernier peuvent être développés dès la classe de troisième, comme le préconise le groupe technique qui a modifié, en France, les programmes des collèges en 1993 ; en revanche, tous les autres ne peuvent être développés qu'au lycée, voire durant les premières années d'université.

L'ensemble du travail réalisé sur le frottement solide sec (cinétique et statique) dépasse un peu le cadre strict du frottement solide sec, puisqu'il montre aussi que les étudiants ont des problèmes avec les forces de contact, quelles qu'elles soient (qu'il y ait ou non frottement). Finalement, si on doit parler mécanique, autant traiter les forces de contact comme des forces qui obéissent aux lois de Newton ; si on doit parler de frottement solide, autant en parler correctement sans escamoter ou « simplifier » les lois qui régissent ce phénomène !

Ce travail de recherche ouvre de nombreuses perspectives. Il serait, par exemple, intéressant d'interroger des élèves plus jeunes (une enquête préliminaire (Bernard, 1994) indique que des élèves plus jeunes dessinent des forces de frottement normales à la surface de contact et non tangentielles) et de faire une étude systématique auprès des maîtres. Par ailleurs, on a l'habitude de dire que les forces de frottement sont dissipatives et donc que le travail des forces de frottement est « négatif ». Or, si nous prenons le cas du roulement sans glissement, le travail de la force de frottement est nul ; dans le cas d'un bloc qui glisse sur un autre, le travail de la force de frottement qui s'exerce sur l'un des blocs est positif, le travail de la force qui s'exerce sur l'autre bloc étant négatif. Que disent les manuels ? Comment raisonnent les étudiants, les maîtres ?

BIBLIOGRAPHIE

- BARQUINS M. (1991). La tribologie ou l'art de frotter. *Revue du Palais de la Découverte*, vol. 19, n° 186, pp. 43-63.
- BAUMBERGER T., RONSIN O., HESLOT F. & PERRIN B. (1994). Dynamique du frottement solide : un système modèle. *Bulletin de la Société Française de Physique*, n° 94, pp. 3-6.
- BAUMBERGER T., HESLOT F. & PERRIN B. (1994). Crossover from creep to inertial motion in friction dynamics. *Nature*, vol. 367, pp. 544-546.
- BERNARD J.-C. (1994). *Le frottement solide sec : étude de difficultés et/ou de raisonnements d'étudiants et de lycéens*. Mémoire de tutorat, DEA, Université Paris 7.
- BESSON U. (1997). *Le frottement solide sec de glissement*. Mémoire de tutorat, DEA, Université Paris 7.
- BOWDEN F.P. & TABOR D. (1964). *The friction and lubrication of solids*. Oxford, Clarendon Press.
- CALDAS H. (1994). *Le frottement solide sec : le frottement de glissement et de non glissement. Etude des difficultés des étudiants et analyse de manuels*. Thèse, Université Paris 7.
- CALDAS H. & SALTIEL E. (1995). Le frottement cinétique : analyse des raisonnements des étudiants. *Didaskalia*, n° 6, pp. 55-71.
- GROUPE TECHNIQUE DISCIPLINAIRE DE PHYSIQUE (1993). *Document d'accompagnement pour la classe de troisième*. Paris, Ministère de l'Éducation nationale et de la Culture.
- RICHOUX H. (1996). *Le frottement solide statique*. Mémoire de tutorat, DEA, Université Paris 7.
- SHAW D.E. (1979). Frictional force on rolling objects. *American Journal of Physics*, vol. 47, n° 10, pp. 887-888.
- VIENNOT L. (1996). *Raisonnement en physique : la part du sens commun*. Louvain-la-Neuve, De Boeck.

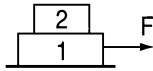
REMERCIEMENTS

Nous voudrions remercier Bernard Perrin pour les nombreuses discussions que nous avons eues sur le frottement solide, Daniel Gil-Perez qui a très gentiment accepté de faire passer des questionnaires et tous ceux et celles qui ont accepté de jouer le jeu de répondre aux questions embarrassantes.

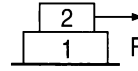
ANNEXE

Questionnaire des deux blocs

Questionnaire A₁



Questionnaire A₂



Un bloc de masse m_1 repose sur une table horizontale parfaitement lisse. Un autre bloc de masse m_2 repose sur le premier. On exerce sur le bloc de masse m_1 (resp. m_2) une force \vec{F} constante. Il existe un frottement entre les deux blocs, alors que le coefficient de frottement entre le bloc 1 et la table sera supposé nul. On constate que le bloc (2) reste lié au bloc (1), c'est-à-dire reste **immobile** par rapport au bloc (1).

1- Quelles sont, dans le référentiel de la table, les forces qui s'exercent sur le bloc (1), sur le bloc (2) ?

2- Existe-t-il une force de frottement appliquée au bloc de masse m_1 ? Si oui, pouvez-vous préciser son sens. Si non, pourquoi ?

3- Existe-t-il une force de frottement appliquée au bloc de masse m_2 ? Si oui, pouvez-vous préciser son sens. Si non, pourquoi ?

4- En mettant un peu de graisse entre les blocs 1 et 2, on constate que le bloc 2 (resp. 1) se déplace toujours vers la droite et que les deux blocs ont un mouvement **relatif non nul**. Le bilan de forces de la première question est-il inchangé ou différent ? Justifiez votre réponse.

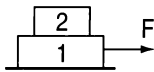
Si on s'intéresse aux *seules forces horizontales*

– il s'exerce sur le bloc «passif» (c'est-à-dire le bloc sur lequel la force \vec{F} n'est pas appliquée : bloc 2 pour le questionnaire A₁ et bloc 1 pour le questionnaire A₂) une force de frottement qui est de même sens que \vec{F} ;

– il s'exerce sur le bloc actif (celui sur lequel la force \vec{F} est appliquée, c'est-à-dire le bloc 1 pour le questionnaire A₁ et le bloc 2 pour le questionnaire A₂) une force de frottement qui est de sens contraire à \vec{F} .

Nous avons représenté ces forces sur une figure, où nous avons « éclaté » le schéma (c'est-à-dire séparé artificiellement les deux blocs) afin que l'on voit bien sur quel objet s'exerce chaque force dessinée.

Questionnaire A₁



Situation A1

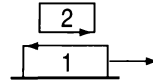
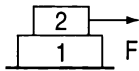


schéma éclaté

Questionnaire A₂



situation A2

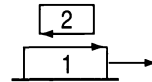


schéma éclaté

Cet article a été reçu le 28/07/98 et accepté le 10/02/99.

Les difficultés d'étudiants post-bac pour une conceptualisation cohérente de la diffraction et de l'image optique

Coherent conceptualization of diffraction and optical imaging : university students' difficulties

Philippe COLIN, Laurence VIENNOT

Laboratoire de Didactique de la Physique dans l'Enseignement Supérieur
Université Denis Diderot, Case 7086
2, place Jussieu
75251 Paris cedex 05, France.

Résumé

Cet article vise à mettre en évidence les difficultés d'étudiants (deuxième et troisième années universitaires) à propos de situations d'optique qui s'analysent classiquement, dans l'enseignement, à l'aide de deux « modèles » à la fois : « géométrique » et « ondulatoire ». Les résultats de trois questionnaires confirment l'existence de problèmes importants pour une compréhension intégrée de ces deux approches. Ils nous amènent à souligner la nécessité de construire une présentation du contenu en cause – situations d'optique impliquant à la fois diffraction et imagerie optique – qui soit adaptée à ce public tout en restant cohérente. Quelques germes pour cette construction sont proposés ici : importance de la notion de

« groupement de rayons » et raisonnement « par l'aval », c'est-à-dire à partir du point d'observation.

Mots clés : difficultés des étudiants, diffraction, optique ondulatoire, optique géométrique, enseignement universitaire.

Abstract

This paper focuses on undergraduate students' difficulties when analysing situations in Optics which imply, in traditional teaching, two models : geometrical optics and wave optics. The findings of three questionnaires show that many students are a long way from a global understanding of these two models. We underline the necessity to build a content analysis of this subject both coherent and well adapted to undergraduate students. Some germs are proposed for this building : emphasis on the notion of « grouping of paths of light » and use of a « backwards » reasoning, starting from the arrival point of the light, in other words from its impact on the considered receiver.

Key words : students' difficulties, diffraction, wave optics, geometrical optics, university teaching.

Resumen

Este artículo pretende poner en evidencia las dificultades de los estudiantes (segundo y tercer año universitario) con relación a situaciones de óptica que se analizan clásicamente en la enseñanza, con la ayuda de los modelos : « geométrico » y « ondulatorio ». Los resultados de tres cuestionarios confirman la existencia de problemas importantes para una comprensión integrada de esas dos aproximaciones. Ello conduce a resaltar la necesidad de construir una presentación del contenido en causa – situaciones de óptica implicando a la vez difracción e imagerie óptica – que sea adaptada a ese público sin perder la coherencia. Algunos germenos para esta construcción son propuestos : importancia de la noción de « grupo de rayos » y razonamiento « por aval », es decir, a partir del punto de observación.

Palabras claves : dificultades de los estudiantes, difracción, óptica onduladora, óptica geométrica, enseñanza universitaria.

INTRODUCTION

L'analyse des difficultés des étudiants dans le domaine des sciences physiques a fait, ces vingt dernières années, l'objet de très nombreuses recherches en didactique (Pfundt & Duit, 1994 ; Tiberghien et al., 1998).

Beaucoup de ces difficultés ont été qualifiées de « communes » non seulement parce qu'elles étaient très répandues, mais aussi parce qu'elles semblaient liées davantage au sens commun qu'à l'enseignement précédemment reçu.

Sur certains domaines, pourtant, il est particulièrement difficile de s'en tenir à l'idée d'une origine non scolaire des difficultés observées, tant il s'agit d'une connaissance élaborée, distante de la vie quotidienne. Cela ne signifie pas que des tendances générales du sens commun ne s'y manifestent pas, comme on a pu l'observer maintes fois (Viennot, 1996a). Mais il est raisonnable de penser que, sur des sujets très académiques, il est particulièrement nécessaire, pour comprendre les réponses des étudiants, d'analyser le contenu de la physique, celui probablement dispensé lors de l'enseignement, celui présenté dans les manuels.

Cet article porte sur les difficultés observées chez des étudiants de deuxième et troisième années universitaires à propos de situations nécessitant une conceptualisation cohérente de la diffraction et de l'imagerie optique. Il s'agit de concilier deux manières de modéliser les phénomènes optiques longtemps présentées, dans l'enseignement, comme exclusives, ne se côtoyant que « à la limite ».

Certes, au niveau où nous nous situons, et même plus tard, chacune pose encore, en elle-même, de gros problèmes aux élèves. Alors que le dispositif optique est le « rassembleur » d'une information optique qui, sans lui, se diluerait dans l'espace, la lentille mince, par exemple, est souvent réduite au rôle de « retourneur » d'une image comprise comme voyageant en bloc de l'objet à l'écran (Fawaz & Viennot, 1986 ; Kaminski, 1989 ; Goldberg & Mac Dermott, 1987 ; Galili, 1996). Un cache sur une lentille mince, dans cette perspective, se traduit (à tort) par la prévision d'un trou dans l'image. La propagation des ondes conduit elle aussi à des difficultés (Maurines, 1986, 1993, 1995, 1997) du fait de la mise en œuvre par les étudiants d'un raisonnement où le signal s'apparente à un mobile répondant plus ou moins aux lois de la mécanique du solide. Nous faisons le choix ici, malgré la connaissance de ces lacunes dans la conceptualisation des étudiants, d'aller voir au delà, au carrefour de ces deux modèles, géométrique et ondulatoire.

C'est, bien sûr, à des élèves initiés à ces deux modèles que nous nous adressons. En France, quelques aspects de l'optique géométrique

sont d'abord introduits, ceci dès le collège et même parfois, en ce qui concerne les ombres, dès l'école primaire. Les premières notions sur les ondes lumineuses viennent avec l'introduction de la diffraction, en seconde actuellement, complétées en terminale par la présentation des interférences lumineuses. L'enseignement universitaire reproduit souvent la même séquence pour aboutir, au plus tard en licence, à un enseignement conséquent des ondes, des interférences et de la diffraction, à travers des dispositifs qui impliquent souvent des lentilles avec leur cortège plus ou moins familier de foyers, plans focaux, conjugaisons objet-image au sens de l'optique géométrique.

Tel est, en principe, c'est-à-dire dans l'intention des enseignants, l'acquis des étudiants dont nous avons recueilli les réponses et analysé les difficultés.

Notons que cette investigation se situe dans un cadre très proche de la pratique courante d'enseignement : elle comporte une question propre à l'enquête portant sur un montage classique de travaux pratiques, et deux questions d'examen, inspirées par les premiers constats de l'enquête et négociées avec un groupe d'enseignants en situation classique d'enseignement. Ce cadre d'interrogation, peu habituel en enquête sur les raisonnements communs, ne doit pas étonner ici : c'est bien aux raisonnements en situation d'enseignement classique, et aussi comme reflets des attentes des enseignants, que nous nous intéressons.

Dans une brève analyse du contenu physique en cause, nous soulignons qu'un point crucial, dans l'usage des tracés qui servent de support de raisonnement en optique, est celui du regroupement de tels tracés que l'on est amené à effectuer, regroupement essentiellement lié au point d'observation. Cet aspect nous sert ensuite de ligne d'analyse pour l'exploration des difficultés d'étudiants manifestées à propos des trois questions, que nous présenterons successivement. Une discussion des résultats introduira la nécessité d'une réflexion approfondie sur la présentation d'un tel contenu.

1. ANALYSE DES SITUATIONS EN TERMES DE REGROUPEMENTS DE « RAYONS »

La conjugaison objet-image en optique géométrique, dans le cadre du stigmatisme, s'exprime classiquement par le fait que tout rayon issu d'un point A de l'objet passe, à la sortie du dispositif optique, par un point image A'. L'image permet de reconnaître l'objet. Elle lui est homothétique. Nous n'en disons guère plus ici sur les « rayons » en question. Chacun sait au moins qu'ils sont censés représenter des trajets de la lumière, lesquels

sont rectilignes en l'absence d'obstacle et de changement d'indice. Insistons en revanche sur l'idée de groupement de rayons qui est intrinsèquement liée à celle de conjugaison objet-image : celle-ci implique que convergent au point image A' tous les rayons issus de A, du moins tous ceux qui passent dans le dispositif optique (encadré 1, (a)).

La relation entre ouverture diffractante (éclairée par une onde plane ou sphérique de fréquence donnée) et figure de diffraction (y compris des trous d'Young ou des réseaux) est tout autre : son analyse implique, cette fois, le regroupement de « rayons » issus de points différents de l'ouverture et parvenant en un point donné (encadré 1, (b)). Là encore, nous gardons le terme de « rayon » sans analyse serrée du contenu, nous contentant de répercuter un usage fréquent. De manière plus neutre, nous emploierons aussi le terme de « tracé ».

Rappelons enfin que ces tracés sont en relation simple avec la notion d'onde lorsqu'il s'agit d'onde plane ou sphérique puisqu'alors ils sont perpendiculaires à des surfaces d'ondes (lieu des points où la phase de l'onde est la même) bien définies.

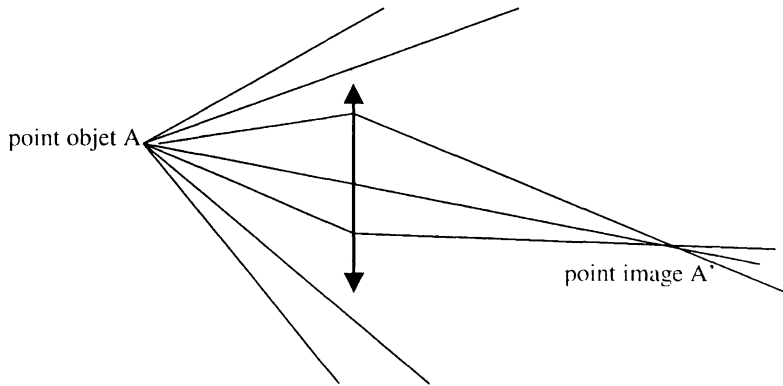
Selon la situation, il est nécessaire de faire fonctionner l'un, l'autre ou les deux types de regroupement. Dans tous les cas, l'analyse de ce que l'on observe en un point part, en quelque sorte, à « rebrousse-rayon » : c'est la position du plan d'observation (plan image conjugué ou plan focal image de la lentille) qui fixe le type de regroupement à opérer (Viennot, 1996b ; Colin, 1997).

Les trois situations analysées ici confrontent, de manière plus ou moins explicite, les étudiants à ce choix de regroupement. Dans chaque cas, nous situerons les réponses données par les étudiants par rapport aux réponses classiquement attendues que nous rappellerons pour chaque question. Nous n'envisagerons pas l'intervention d'un traitement analytique complet en termes d'optique de Fourier appliquée à la conjugaison optique comme aux situations classiques de diffraction (voir par exemple Goodman, 1972).

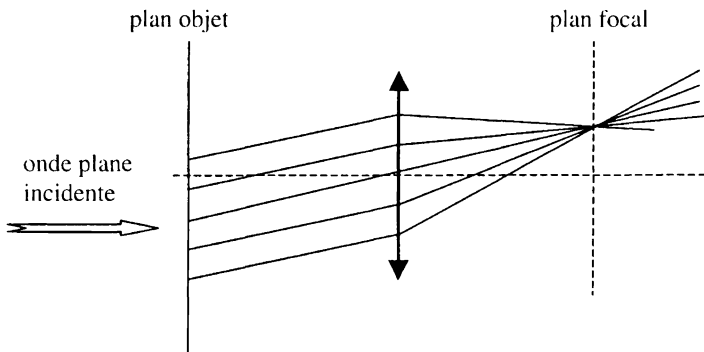
Notre analyse ne constitue qu'une étape vers une explicitation du contenu que pourrait viser l'enseignement, à propos de ce que l'on nomme souvent les modèles « géométrique » et « ondulatoire ». Nous comptons sur d'autres volets de notre recherche (analyse fine du contenu, analyse de manuels, enquête auprès d'enseignants) pour informer une tentative de formulation d'un contenu qui soit accessible à la population d'étudiants concernée tout en restant cohérente.

ENCADRÉ 1

Analyse classique de situations en termes de regroupements de « rayons » dans deux cas : conjugaison d'optique géométrique (a), figure de diffraction (b).



(a) Conjugaison objet-image en optique géométrique



(b) Obtention de la figure de diffraction d'un objet

2. PREMIÈRE MISE EN ÉVIDENCE

2.1. Présentation du questionnaire 1

Le texte de ce questionnaire (Dreyer, 1996) se fonde sur une situation courante en travaux pratiques d'optique : on « agrandit » une figure d'interférence par l'usage d'une lentille. On pourrait d'ailleurs, de la même manière, « agrandir » une figure de diffraction.

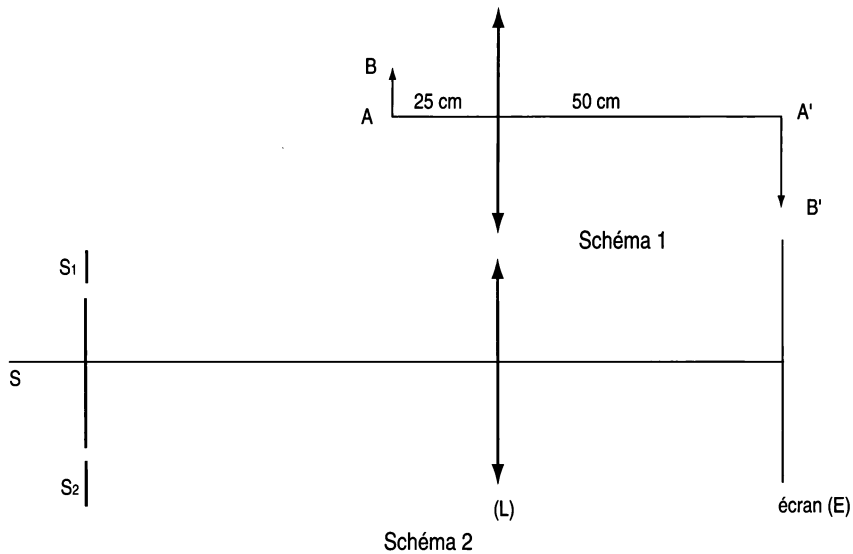
Il s'agit donc d'une invitation à expliciter le contenu d'une expérience classique d'enseignement.

Le texte du questionnaire est reproduit en encadré 2.

ENCADRÉ 2

Texte du questionnaire

Dans le dispositif représenté sur le schéma 2, la lentille (L) est telle qu'on obtient la correspondance objet réel-image réelle suivant le schéma 1. La lentille (L) est utilisée pour faire apparaître sur l'écran (E) des franges d'interférence dues aux sources ponctuelles cohérentes S_1 et S_2 .



L'échelle des schémas 1 et 2 selon l'axe horizontal est la même.
L'écartement des sources S_1 et S_2 N'EST PAS à la même échelle.

Questions

On observe sur (E) des franges nettes : ceci est-il l'image de quelque chose à travers (L) ?

Oui De quoi est-ce l'image ? Expliquer.

Non De quoi d'autre s'agit-il ? Expliquer.

2.2. Les réponses attendues au questionnaire 1 : « deux modèles »

Une réponse couramment considérée comme correcte est qu'on observe sur l'écran l'image de la distribution lumineuse (des franges d'interférences) dans le plan conjugué, à 25 cm en avant de la lentille. Il nous semble au moins aussi correct de dire que les franges observées sur l'écran, derrière la lentille, sont la distribution d'intensité lumineuse résultant des interférences entre les ondes diffractées en S_1 et S_2 (voir en annexe un rappel du principe du dispositif des trous d'Young). Chacune de ces ondes subit, dans la lentille, une transformation de type conjugaison optique (entre S_1 et son image S'_1 , respectivement S_2 et S'_2). Aux points situés à 25 cm en avant de la lentille, les deux ondes se superposent sans avoir, sauf exceptionnellement, la même phase. Remarquons pourtant que chacun de ces points ne constitue pas un objet ponctuel au sens habituel du terme puisqu'il n'est pas la source d'une onde sphérique.

En tout état de cause, l'argumentation doit mettre en œuvre à la fois un phénomène d'interférences typiquement ondulatoire et l'action de la lentille sur la lumière en relation avec la conjugaison optique.

Si l'on souhaite déterminer les deux trajets de lumière aboutissant au point d'observation M' , ce qui n'était pas demandé, le plus simple est de procéder comme suit.

La connaissance des positions des plans objet et image, telles que figurées sur le schéma 1 de l'énoncé de la question 1 (encadré 2), permet de construire l'image de tout point appartenant au plan objet en se servant, par exemple, du rayon central non dévié par la lentille. De là, on peut déduire tout trajet de lumière parvenant en M . La construction des trajets de la lumière issus de S_1 et S_2 qui aboutissent au point M' est donnée en figure 1. Elle s'effectue, en quelque sorte, à « rebrousse-rayon » : à partir de la connaissance du point M' de l'écran, on peut déterminer la position du point M et, enfin, effectuer les tracés correspondants entre la source et ce point M .

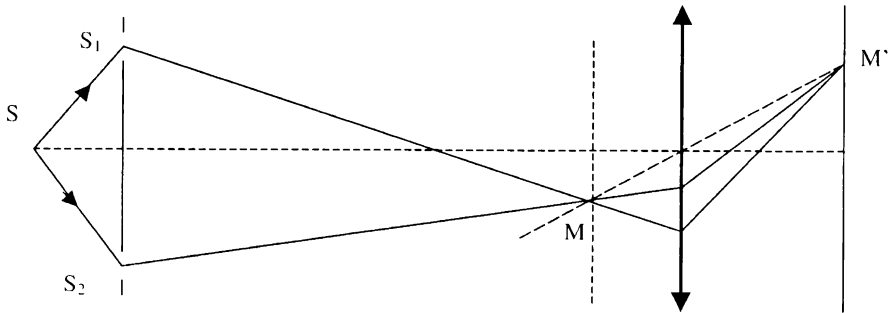


Figure 1 : **Schéma correct (non demandé) pour le dispositif du questionnaire 1**

L'égalité entre les deux chemins optiques correspondant aux deux trajets joignant M et M' assure que l'état interférentiel est le même en ces deux points. On comprend alors pourquoi la distribution d'intensité lumineuse sur l'écran est identique, au grandissement près, à celle que l'on obtiendrait en mettant un écran au plan objet.

Nous voyons donc que la situation proposée ne nécessite, à ce niveau d'analyse, aucun algorithme complexe. La difficulté réside plus ici dans la combinaison de deux situations classiques, dispositif des trous d'Young d'une part, « déviation » d'un trajet de lumière et formation d'une image par une lentille de l'autre. Ces questions appartiennent par tradition à deux approches différentes, optique ondulatoire et optique géométrique, ici impliquées dans une situation « mixte ». Il est alors nécessaire de mettre en oeuvre les deux approches afin de comprendre, d'une part, la sélection opérée sur tous les tracés que l'on peut envisager à partir des sources diffractantes S_1 et S_2 pour trouver ceux qui parviennent au point M' et, d'autre part, le statut de ce qui est observé sur l'écran.

2.3. Conditions d'enquête

Cette enquête porte sur un ensemble de 120 étudiants : 71 étudiants de classes de Mathématiques Spéciales Technologiques d'un lycée parisien et 49 étudiants de l'université Denis Diderot (Paris 7) en licence de physique. Les résultats très voisins de ces deux échantillons ont été regroupés. La durée de passation du questionnaire est de 15 minutes environ. Elle intervient après enseignement des interférences.

2.4. Analyse des réponses

Nous avons analysé ces réponses en nous centrant sur l'utilisation des modèles géométrique et/ou ondulatoire opérée par les étudiants pour justifier leurs réponses. La teneur de ces justifications nous intéresse plus, en l'occurrence, que l'affirmation ou la négation de la formation d'une image sur l'écran. Les catégories regroupant l'ensemble des réponses ont été construites relativement à cette problématique. Elles sont décrites de manière brève dans le tableau 1, assorties des taux d'occurrence correspondants. Les commentaires que nous citons dans l'analyse qui suit préciseront la signification de ces catégories.

catégorie de réponses	réponses brutes	
(1) « deux modèles » avec localisation du plan objet	OUI	11 %
(2) « deux modèles » mais pas de localisation du plan objet	OUI	13 %
(3) « un seul modèle (géométrique) »	OUI ou NON	18 %
(4) « un seul modèle (ondulatoire) »	NON	28 %
(5) autres justifications fausses	OUI ou NON	6 %
(6) sans justification ou sans réponse	OUI ou NON ou rien	24 %

Tableau 1 : Types de réponses au questionnaire 1 et pourcentages associés

Tout d'abord, nous constatons la faiblesse du pourcentage de réponses (24 % : catégories (1) et (2)) s'appuyant sur deux modèles. Parmi celles-ci, la moitié seulement (11 % : catégorie (1)) manifeste une compréhension, encore incomplète, de la conjugaison objet-image. Ensuite, nous remarquons la forte proportion d'étudiants (24 % : catégorie (6)) n'apportant aucune réponse ou des réponses sans justification.

Enfin, et c'est pour nous le résultat le plus important, nous notons que près d'un étudiant sur deux (46 % : catégories (3) et (4)) n'utilise qu'un seul des deux modèles pour tenter d'interpréter la situation.

Pour les étudiants qui ne s'appuient que sur l'optique géométrique (catégorie (3)), les franges présentes sur l'écran sont considérées comme une image et impliquent donc la recherche des sources lumineuses constituant l'objet. Les seules présentes étant les sources S_1 et S_2 , les étudiants donnent la réponse type suivante : « *c'est l'image des sources ponctuelles S_1 et S_2* ». Certains vont même jusqu'à écrire « *on observe l'image de l'objet AB* » marquant leur souci de trouver une source « matérielle » là où il n'en existe pas.

Les réponses négatives s'appuyant sur le modèle ondulatoire (catégorie (4)) font référence, plus ou moins explicitement, à la formation sur l'écran de quelque chose (figure ou franges d'interférences) sans liaison explicite avec la conjugaison mise en jeu en optique géométrique. Voici deux exemples de ce type de réponses :

« *Ce n'est pas une image, c'est une interférence entre les ondes lumineuses cohérentes.* »

« *Ce n'est pas une image, c'est une figure d'interférence entre les deux ondes lumineuses issues des foyers secondaires S_1 et S_2 .* »

Dans certaines de ces formulations apparaît le terme « rayon » dont on ne peut exclure qu'il soit associé à l'optique géométrique, mais le rôle de la lentille est passé sous silence :

« *Ce n'est pas une image, ce sont des franges d'interférences dues à l'intersection de deux rayons provenant de S_1 et S_2 .* »

« *Ce n'est pas une image. On visualise les interférences entre les rayons issus de S_1 et ceux issus de S_2 sur l'écran.* »

La difficulté de la synthèse entre optiques géométrique et ondulatoire peut même s'exprimer par une assez brutale négation du rôle de la lentille, uniquement pensée comme système « imageur » :

« *Non, ce n'est pas une image. Pour qu'il y ait une image d'un objet sur l'écran par rapport à la lentille, il faudrait que l'objet soit placé à 25 cm avant la lentille. Donc la lentille n'a pas de rôle. On voit les franges de l'interféromètre d'Young sur l'écran.* »

Enfin elle peut se traduire graphiquement, comme sur le schéma reproduit en figure 2.

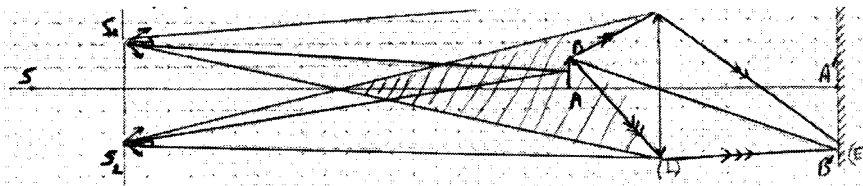


Figure 2 : **Un schéma en réponse au questionnaire 1**
Disjonction de deux types de construction

Sur ce schéma, fourni spontanément par l'étudiant, aucune relation n'est suggérée entre la partie gauche représentant une situation d'interférences et la partie droite reproduisant la construction de l'image $A'B'$ de l'objet AB .

D'autres constructions du même type seront largement rencontrées à propos des deux questionnaires analysés plus bas.

2.5. Bilan pour le questionnaire 1

Nous avons souligné les difficultés inhérentes à la situation proposée : bien que celle-ci soit très classique, elle n'en est pas pour autant simple à analyser puisqu'elle combine deux situations, l'une typique d'optique ondulatoire – le dispositif des trous d'Young – l'autre typique de l'optique géométrique – la formation d'une image par une lentille mince convergente. Les étudiants sont donc amenés à mettre en oeuvre les deux modèles.

Outre la faiblesse du pourcentage de réponses faisant apparaître clairement les deux modèles (11 %), nous retiendrons que près d'un étudiant sur deux ne semble utiliser qu'une seule approche à la fois, géométrique ou ondulatoire, et ne peut donc pas parvenir à une synthèse cohérente. Une difficulté apparaît ici liée au caractère non classique de « l'objet » : franges d'interférences non « matérialisées ».

En matière de schéma, rien n'était demandé. Il suffisait de s'appuyer sur la définition de la conjugaison optique objet-image et, à la limite, un schéma était susceptible de compliquer les choses. Celui que nous avons cité en montre bien toute la difficulté : comment utiliser les mêmes tracés dans deux types de construction ? Les tracés utilisés pour interpréter l'état interférentiel d'un point du plan conjugué de l'écran (en figure 2) s'arrêtent net, dans ce schéma, lorsqu'il faut aborder la lentille pour poursuivre la construction.

Les questionnaires suivants mettent l'accent, cette fois, sur les constructions de schémas et donc sur les regroupements de tracés. En revanche, ils évitent la difficulté signalée sur le caractère non classique de « l'objet ». La conjugaison optique absente dans la situation précédente est cette fois pleinement assurée (questionnaire 2) par la présence d'un objet bien matériel : une diapositive.

3. IMAGE GÉOMÉTRIQUE D'UN OBJET DIFFRACTANT : QUESTIONNAIRE 2

Le cadre de l'enquête est celui d'un examen (juin 1996) après un enseignement de licence sur les ondes, dont la diffraction a constitué l'un des derniers sujets traités. L'essentiel du problème posé porte sur le phénomène de diffraction observé dans le plan focal d'une lentille. La

formation de l'image géométrique n'intervient que comme question préliminaire (c'est sur elle que portera notre analyse) et comme question finale où l'on demande de décrire l'aspect de l'image obtenue après un filtrage spatial. L'analyse s'appuie sur les réponses de 169 étudiants.

3.1. Énoncé du questionnaire 2

L'encadré 3 donne le texte du questionnaire 2.

ENCADRÉ 3

Image géométrique d'un objet diffractant : questionnaire 2

Une diapositive représentant un motif géométrique est placée, comme l'indique le schéma ci-dessous, à une distance $p = 75$ cm d'une lentille convergente de distance focale $f = 50$ cm, perpendiculairement à l'axe optique de la lentille. La diapositive est éclairée, sous incidence nulle, par une onde plane monochromatique (longueur d'onde $\lambda = 500$ nm).

L'image de la diapositive se forme sur un écran placé à une distance d de la lentille. Sur un schéma analogue à celui du texte, tracer les trajectoires d'au moins trois rayons issus de la diapositive et convergeant en un point P de l'écran, en dehors de l'axe optique.

3.2. Réponse attendue

L'objet « flottant » que constituait les franges d'interférences du questionnaire précédent, se trouve remplacé ici par un objet tout à fait matériel, une diapositive. Les deux modèles géométrique et ondulatoire

interviennent conjointement : chaque point de la diapositive constitue par diffraction un point dont la lentille fournit l'image optique (nous ne pouvons pas ici entrer dans le détail des mécanismes intervenant au sein de la diapositive et nous nous contenterons de rappeler qu'il s'agit d'une approximation dont les conditions de validité sont satisfaites dans la situation présentée). Voici donc bien en oeuvre deux approches : diffraction et imagerie optique.

Classiquement, la construction de l'image optique s'appuie sur le tracé de rayons particuliers dont nous connaissons la marche. Le tracé d'un seul rayon suffit pour trouver le point objet correspondant au point image P puisque les positions des plans image et objet sont connues. On attend donc, par exemple, le tracé du rayon (1) passant par le centre optique de la lentille ou d'un rayon (2) passant par un foyer (figure 3). Les tracés des autres rayons demandés devant passer par les points objet et image peuvent ensuite être déterminés grâce à la seule connaissance du couple objet-image en cause.

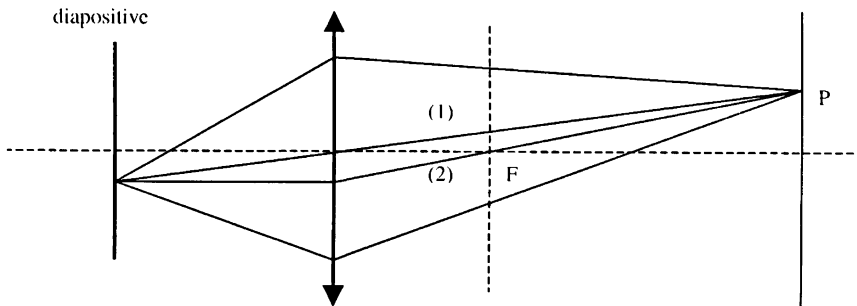


Figure 3 : Une réponse correcte au questionnaire 2

3.3. Analyse des réponses

Les résultats sont donnés dans le tableau 2.

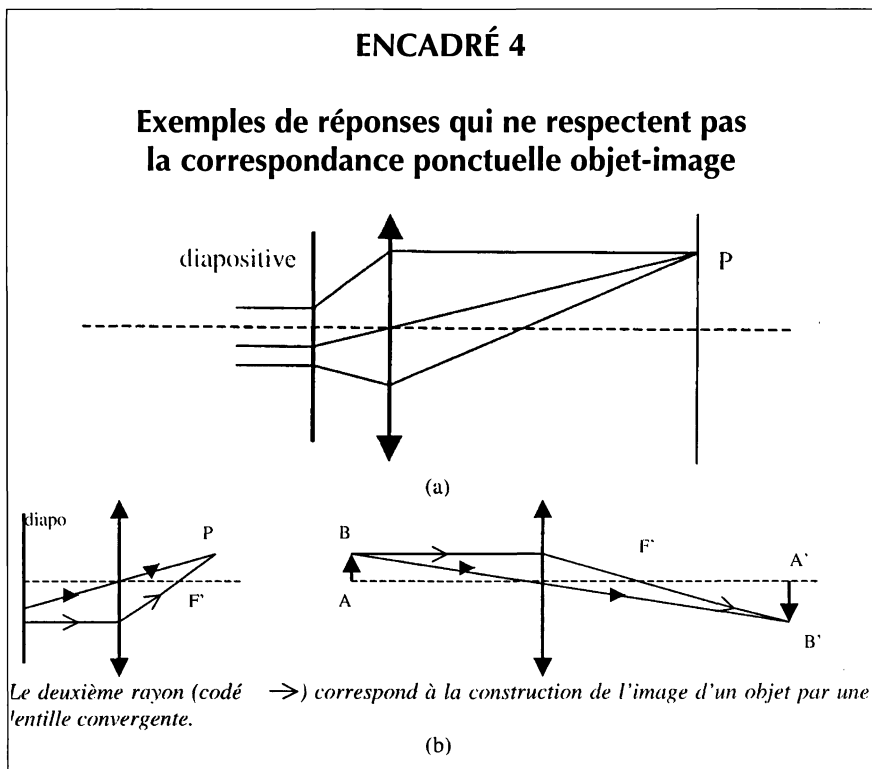
Construction correcte	27 %
Construction incomplète (traçage de deux rayons seulement)	2 %
Construction fautive	59 %
Sans réponse	12 %

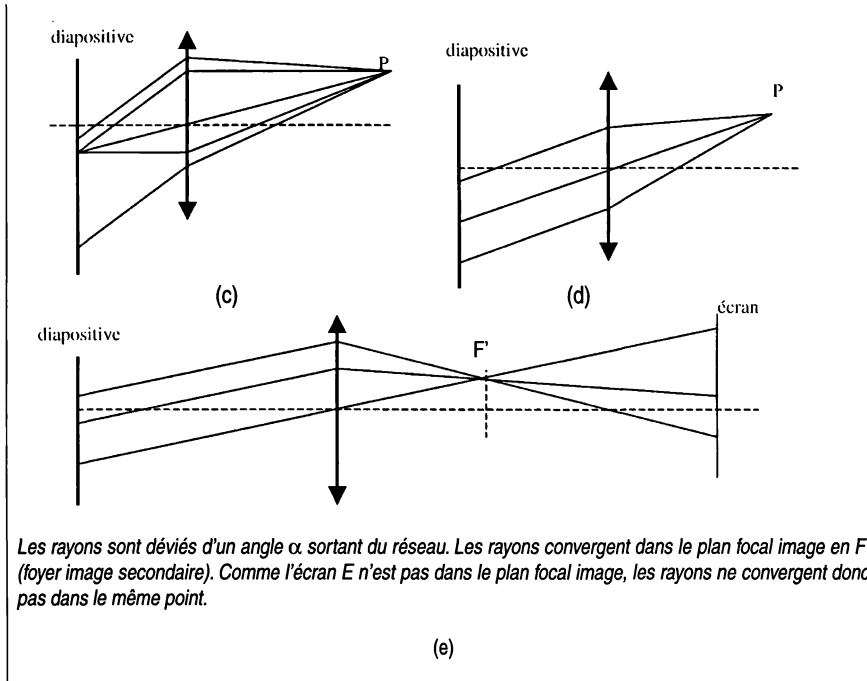
Tableau 2 : Catégories de réponses au questionnaire 2 et pourcentages associés

Seul un étudiant sur quatre effectue correctement la construction.

L'examen des constructions fausses (59 %) autorise un premier constat : dans la presque totalité de ces cas (54 % du total), la correspondance point à point n'est pas réalisée : pour plus d'un étudiant sur deux, l'idée de groupement de rayons issus d'un point et convergeant en un autre point n'a pas prévalu dans cette situation qui implique aussi la diffraction. L'encadré 4 rassemble des exemples de telles réponses.

Un aspect commun à ces schémas est la convergence vers un point P au delà de la lentille. Cependant les tracés en cause ne proviennent pas tous du même point de la diapositive. Dans la moitié de ces réponses (soit un quart de l'effectif total : 27 %), les rayons incidents proviennent de points différents mais respectent certaines règles de l'optique géométrique (réponse (a)). La réponse (b) montre que ce n'est pas faute d'une connaissance du schéma prototypique. Seulement, cette connaissance n'a pas installé l'essentiel, c'est-à-dire le critère auquel est astreint le groupement des rayons convergeant au point image P : tous les rayons issus du point objet, et rien que ceux-là, convergent au point image.





Pour l'autre moitié (23 % de l'effectif total), c'est la nécessité de parallélisme des rayons incidents qui semble avoir prévalu (réponse (d)). Tous les rayons incidents sur la lentille sont parallèles entre eux, comme lorsque l'on étudie la diffraction et elle seule. Ces rayons convergent en un point qui est censé appartenir à l'image de la diapositive formée par la lentille.

La réponse (e), inadaptée mais correcte, rappelle d'ailleurs que si l'on est parti comme d'habitude de la diapositive avec des rayons parallèles, il est bien difficile d'assurer ensuite la convergence requise au point P.

La réponse (c) illustre une catégorie minoritaire de réponses (4 % de l'effectif total), intermédiaire entre les types de réponses (a) et (d), où tout irait bien sans l'adjonction de rayons parallèles entre eux, et donc issus de points différents de la lentille.

3.4. Bilan pour le questionnaire 2

Nous avons pensé que la mise en oeuvre de la conjugaison optique serait facilitée du fait du remplacement de l'objet « flottant » du premier questionnaire, les franges d'interférence, par un objet matériel, la diapositive

en l'occurrence. Or, dans ces conditions apparemment plus favorables, la mise en œuvre de la conjugaison optique apparaît ici comme très perturbée par la situation de diffraction.

Un étudiant sur cinq va jusqu'à faire subir à un ensemble de rayons parallèles, regroupement classique en étude de diffraction, le sort normalement assigné à un ensemble de rayons émis par un point unique de la diapositive, dont la lentille formerait l'image sur l'écran si celui-ci se trouvait dans le plan conjugué de la diapositive.

Du fait de la complexité de l'onde diffractée par l'objet, il est nécessaire, pour l'analyser, d'effectuer une sélection bien précise des tracés envisagés. Cette idée, et le critère de sélection à mettre en œuvre, semblent bien peu présents dans les réponses d'étudiants devant cette situation perturbante : introduction d'une question typique d'optique géométrique dans un contexte « fortement ondulatoire ».

4. FIGURE DE DIFFRACTION D'UN OBJET : QUESTIONNAIRE 3

Si la diffraction apparaît perturbante dans le questionnaire 2, il est néanmoins tout à fait indispensable de la prendre en compte. En effet, sans une action de la diapositive sur l'onde plane, on voit mal comment l'onde, au delà de la diapositive, pourrait porter une information sur celle-ci. S'interroger sur la nature de cette action est alors essentiel. Les nombreux « rayons » obliques observés sur les schémas relatifs à la question précédente suggèrent que quelque chose du registre de la diffraction a été pris en compte, mais quoi ? Les questions proposées ici éclairent la façon dont les étudiants comprennent ce point. On notera que la démarche proposée dans cette série d'items procède, comme nous l'indiquions plus haut, à « rebrousse-rayons », c'est-à-dire de l'aval (le point M) vers l'amont (les trous).

Il faut aussi remarquer que cette situation, banale entre toutes dans un cours de licence qui concerne la diffraction, n'est pas si anodine que cela. En effet, tout se passe « normalement » jusqu'à la lentille : comme d'habitude en diffraction, on va se trouver en présence de tracés parallèles issus des divers points de la diapositive. En aucun cas, ceux-ci ne symbolisent une onde plane, un plan perpendiculaire à leur direction n'est pas davantage un plan d'onde : ne passe-t-on pas force heures d'enseignement à calculer les déphasages associés ? Mais la lentille va être, en général sans beaucoup d'explications préalables de la part du corps enseignant, considérée comme faisant sur ces « rayons » le même travail

que si ils appartenait à une onde plane : chacun est dévié vers le foyer secondaire correspondant. L'analyse porte sur les réponses de 251 étudiants de licence données à l'occasion d'un partiel sur les ondes (mai 1996).

4.1. Énoncé des questions (questionnaire 3)

L'énoncé des questions sur lesquelles porte l'analyse est donné en encadré 5.

ENCADRÉ 5

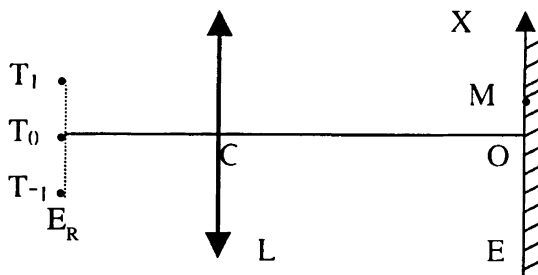
Figure de diffraction d'un objet : questionnaire 3 (présentation de la situation et questions)

Un écran (E_R) est percé de trois trous identiques T_0 , T_1 , T_{-1} , séparés par une distance l . Une lentille convergente (L) de distance focale f est disposée à la suite de l'écran (E_R), son axe optique coïncidant avec l'axe de symétrie de (E_R) perpendiculaire à cet écran.

Un autre écran (E) coïncide avec le plan focal image de (L)

On éclaire l'écran (E_R) avec une onde plane monochromatique de longueur d'onde λ , se propageant selon la direction perpendiculaire à l'écran.

On s'intéresse à la répartition de l'intensité lumineuse reçue sur l'axe OX de l'écran (E) (voir le schéma).



Les trois trous très fins sont assimilables à des sources ponctuelles.

On considère un point M sur OX , d'abscisse X .

Questions

- 1)
 - a) Représenter sur un schéma, identique à celui du texte, les trajets des pinceaux lumineux issus des trous et qui parviennent en M.
 - b) Expliquer votre réponse.
 - c) Quel phénomène, au niveau des trous, permet que la lumière suive effectivement ces trajets ?
- 2) Calculer l'amplitude lumineuse en M, à un facteur de phase près, en fonction de X et de l'amplitude U_0 de l'onde au niveau de chaque trou. Justifier le principe de ce calcul.

4.2. Réponses attendues

Une construction correcte (question 1a) est donnée figure 4.

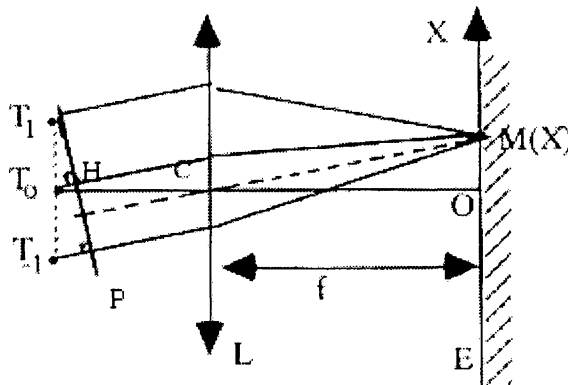


Figure 4 : **Schéma attendu*** en réponse au questionnaire 3 (*voir le texte)

Pour être jugée correcte, la réponse doit faire figurer le tracé CM joignant le centre C de la lentille au point M d'observation. En effet (question 1b), seuls les rayons parallèles à CM parviennent en M car M est un foyer secondaire. La justification de la construction doit donc faire référence aux propriétés des lentilles. Notons qu'en toute rigueur, il n'existe pas de pinceau lumineux issu d'un trou supposé ponctuel et convergeant strictement au point M mais bien un tracé unique. Si un pinceau issu d'un trou est tracé, il doit converger au point image de ce trou et non en M.

Pour justifier les trajets à partir des trous (question 1c), l'étudiant doit mentionner la diffraction : les trous sont suffisamment fins pour renvoyer, par diffraction, de la lumière dans un large éventail de directions ; l'ensemble « lentille-point M de l'écran » sélectionne l'une d'entre elles.

Le calcul du déphasage entre les ondelettes parvenant au point M (question 2) est très classique. Il utilise la relation de proportionnalité liant phase de l'ondelette et chemin optique parcouru. On se ramène donc pour calculer la différence de phase entre les ondelettes issues de deux trous, par exemple de T_0 et T_1 , au calcul de la différence de chemin optique pour aller de T_0 à M et de T_1 à M (figure 4). Cette différence est celle existant entre les distances de chaque trou à un plan P perpendiculaire à la direction commune des rayons incidents considérés (figure 4). En effet, au delà d'un tel plan, les chemins optiques qui restent à parcourir jusqu'à M sont tous égaux du fait des propriétés de la lentille.

4.3. Analyse des réponses au questionnaire 3

4.3.1. Question 1 du questionnaire 3

Quelques chiffres seulement suffiront à situer la difficulté globale ressentie par les étudiants, pour cette première question, que l'on pourrait considérer comme élémentaire à ce niveau d'études : seul un étudiant sur deux répond correctement aux questions 1a et 1b, et mentionne la diffraction en réponse à la question 1c.

Parmi les justifications correctes en 1b, on trouve chez un peu moins de 10 % des étudiants l'idée que ces tracés parallèles ont été sélectionnés par le choix du point M et la lentille.

Les justifications incorrectes, voire fausses, ou relatives à des constructions fausses, en question 1b et 1c concernent près d'un tiers des étudiants (respectivement 37 % et 28 %).

Pour ce qui concerne la construction demandée, nous retenons plus particulièrement les justifications fausses (14 % du total), qui accompagnent des tracés parallèles dessinés à la sortie des trous (29 % de l'effectif total ; ces tracés sont conformes, entre les trous et la lentille, à la réponse correcte). Y sont présentes les idées suivantes illustrées par les réponses de l'encadré 6 :

- les rayons incidents sur la lentille viennent de l'infini, « de la même source », « traversant tout droit » les trous (encadré 6 (a), (b), (c), (d)) ;
- chaque « rayon » émergeant d'un trou est *la (seule ?) suite* du rayon qui est arrivé sur ce trou, comme en témoignent les expressions « dévié », « déviation », ou des symbolisations continues (encadré 6 (e), (f), (g)).

Cette dernière idée, présente également en accompagnement de constructions fausses, concerne au total 14 % des étudiants.

4.3.2. Question 2 du questionnaire 3

Les aspects de réponses que l'on vient de mettre en évidence (question 1) trouvent un écho atténué dans les réponses à la question 2. Celle-ci prend un tour plus calculatoire, et d'ailleurs, sur 240 étudiants n'ayant pas proposé (à l'instar de 11 autres) une solution purement calculatoire s'appuyant sur l'optique de Fourier, 80 % parviennent à un résultat correct, 57 % accompagnant ceci d'un schéma correct, tandis que 20 % s'accommodent très bien d'un schéma faux pour aboutir à ce même résultat correct.

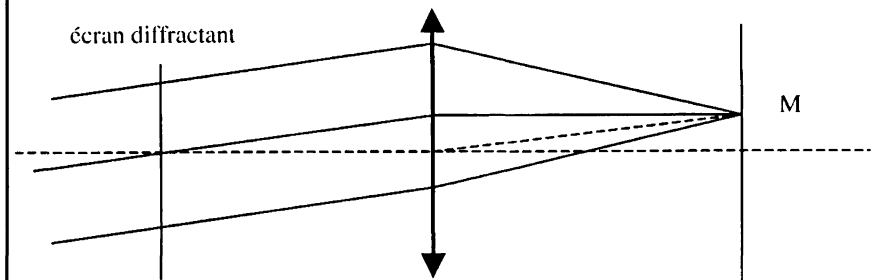
Seuls 19 % des étudiants donnent une justification de leur calculs. Le pourcentage de justifications réellement satisfaisantes reste difficile à estimer. Les justifications par une discussion de chemins optiques parcourus débouche sur des difficultés de mise en œuvre de résultats d'optique géométrique. Le théorème de Malus (voir par exemple Born & Wolf, 1980), souvent évoqué, met alors en scène des surfaces d'onde. Or on a bien dit qu'il n'y en avait guère de disponibles dans les parages. Revoilà la question soulevée plus haut : pour chaque « rayon » diffracté, on admet que la lentille fait comme s'il s'agissait d'un représentant d'une onde plane, mais l'ensemble concerné n'en constitue pas une.

ENCADRÉ 6

Quelques idées fausses à propos de la diffraction

Les rayons viennent de l'infini comme ceux d'une onde plane et traversent les trous tout droit.

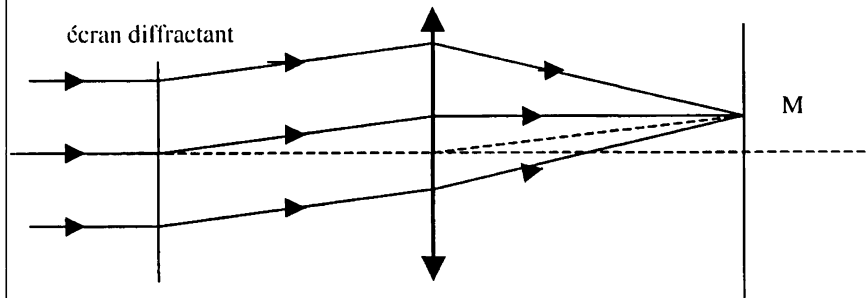
- (a) « Le faisceau lumineux provenant d'une source placée à l'infini, tous les rayons suivent un chemin parallèle les uns aux autres. Les trous laissent passer des rayons qui suivent toujours la même direction. »
- (b) « Le schéma définit un réseau à trois fentes (...) »



- (c) « Tous les pinceaux lumineux issus des trois trous convergent en un même point M de l'écran. En effet, ces trois faisceaux proviennent de l'infini (...) »
- (d) « L'écran E est dans le plan focal image de la lentille L. Donc le point M est l'image d'un objet venant de l'infini (...) »

Chaque rayon émergeant d'un trou est la suite du rayon qui est arrivé sur ce trou : le rayon est « dévié ».

- (e) « Les rayons incidents sont parallèles à l'axe et sont déviés d'un même angle. Tous les rayons émergents arrivent sur la lentille parallèles entre eux. »



- (f) « On considère les rayons parallèles qui sont déviés dû au phénomène de diffraction d'un même angle car ils sont parallèles avant d'atteindre les fentes (...) »
- (g) « Les rayons lumineux arrivant sur les fentes sont parallèles entre eux. Au passage des fentes, ces rayons sont déviés mais restent parallèles entre eux. »

4.4. Bilan pour le questionnaire 3

Nous nous proposons ici de mieux cerner la façon dont les étudiants prennent en compte le phénomène de diffraction, en centrant notre analyse sur les regroupements de « rayons » mis en jeu lors de l'obtention d'une figure de diffraction. Nous retenons les idées essentielles suivantes.

L'idée de sélection de tracés, fortement liée à celle de structure complexe de l'onde diffractée, semble souvent absente : ne sont pris en compte que les seuls tracés figurant sur les schémas, et rien, dans la plupart des réponses, ne suggère que chaque trou diffracte de la lumière dans un large éventail.

Cette absence peut conduire, d'une part, à une interprétation erronée de la diffraction comme une déviation des rayons incidents vers la direction des « rayons » diffractés représentés, d'autre part, à assimiler « rayons » diffractés dans une direction donnée et onde plane, assimilation déjà relevée dans plusieurs manuels d'enseignements (Colin, 1997).

De plus, l'absence d'un questionnement sur le statut des tracés amène certains étudiants à utiliser les règles de l'optique géométrique, par exemple celles données par le théorème de Malus, hors de leur cadre d'application : tous les tracés deviennent ainsi des rayons lumineux de l'optique géométrique, dont le parallélisme suggère l'existence d'une onde plane.

5. DISCUSSION

Le questionnaire portant sur le dispositif des trous d'Young (questionnaire 1) a mis en évidence combien il était difficile pour beaucoup d'étudiants de faire la synthèse des approches géométrique et ondulatoire. Près d'un étudiant sur deux apporte des réponses ne s'appuyant que sur un seul modèle, géométrique ou ondulatoire.

La « non-matérialité » de l'objet, en l'occurrence des franges d'interférence, ayant pu constituer un obstacle important, nous avons poursuivi notre enquête en utilisant un objet bien matériel, une diapositive (questionnaire 2). Même dans ce cas, la conjugaison optique, principe de base de la formation de l'image géométrique d'un objet, n'est pas mise en oeuvre par la moitié des étudiants. Elle se réduit pour beaucoup à la convergence au point image de « rayons » de provenance variée. Ceci est bien éloigné d'une compréhension en termes de regroupement de « rayons » issus du point objet et convergeant au point image.

La dernière partie de l'enquête (questionnaire 3) nous a permis de mettre en évidence les difficultés d'un grand nombre d'étudiants concernant le phénomène de diffraction, au regard plus particulièrement de la structure de l'onde diffractée et du statut des « rayons » représentés sur leurs schémas.

Nous avons souligné les points suivants :

- absence de l'idée de sélection des tracés suivant le point d'observation choisi, sans doute en étroite liaison avec la non-prise de conscience de la structure complexe de l'onde diffractée, si l'on en juge par la seule prise en compte des « rayons » diffractés suivant une direction donnée ;

– aucun questionnement sur le statut des tracés, ce qui amène à identifier ceux-ci systématiquement aux rayons lumineux de l'optique géométrique ; cette identification permet d'interpréter les faits suivants : d'une part présentation erronée de la diffraction comme une déviation des rayons incidents vers la direction (unique) des « rayons » diffractés représentés, d'autre part, assimilation des « rayons » diffractés dans une direction donnée à une onde plane, l'optique géométrique étant mise en oeuvre hors de son domaine de validité.

Au delà du constat habituel sur la distance entre les performances calculatoires des élèves et leur niveau de compréhension des phénomènes en cause, il nous semble important de revenir à la fois sur la nature des difficultés conceptuelles des étudiants et sur un éclairage des contenus enseignés qui réponde de manière appropriée à ces difficultés.

Quand tant d'études sur les difficultés en optique géométrique nous apprennent la prégnance d'un modèle global du transport de l'information lumineuse, l'objet émettant une image de lui-même qui se transporte en bloc jusqu'à l'écran, quand plus largement on sait que les raisonnements les plus répandus dans la physique commune prennent le format d'une histoire, alors on ne peut s'étonner qu'il soit difficile d'analyser des situations par procédure de tri dans un tout complexe, et encore plus d'effectuer ce tri à « rebrousse-rayons », c'est-à-dire comme si l'on remontait le temps.

Autre aspect des difficultés : les « rayons », chemins de lumière, prennent eux-mêmes le statut de héros de l'histoire, leurs tracés en deviennent le compte rendu. Cette vision qui réduit l'histoire à la géométrie laisse en route une partie de l'information : la phase. Elle n'autorise qu'une seule histoire pour un dessin donné : ainsi, des tracés parallèles représentent une onde plane, ils « viennent » de l'infini, nécessairement.

Ces résultats et ces réflexions nous semblent poser très fortement la question de la présentation adoptée, dans l'enseignement, pour les deux approches des phénomènes optiques impliqués : géométrique et ondulatoire. Quelle place fait-on traditionnellement, quel éclairage convient-il d'adopter, pour les aspects que nous venons de soulever ? Pourquoi laisser penser, par une symbolisation identique, qu'avant et après un trou d'Young, il s'agit du même rayon ? Comment signale-t-on, justifie-t-on, qu'un même tracé de « rayon diffracté » n'appartenant, de manière évidente, à aucune onde plane ou sphérique, se calque ensuite, à travers la première lentille rencontrée, sur le tracé d'un « rayon d'optique géométrique » qui serait lui associé à une onde plane ou sphérique ? Y a-t-il lieu de souligner que le statut d'un tracé dépend hautement de l'ensemble de tels tracés dans lequel on a décidé de l'inclure pour l'analyse d'un aspect donné de la situation ?

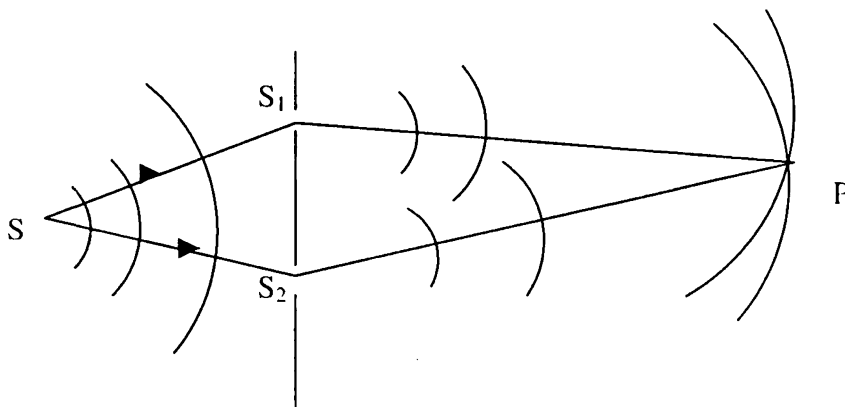
Telles sont les questions, au centre de nos recherches présentes, qu'il nous semble essentiel de prendre en compte si l'on veut définir, pour les situations impliquant à la fois diffraction et imagerie optique, un niveau de conceptualisation qui soit cohérent, moins complexe qu'une optique de Fourier généralisée, et adapté aussi bien aux étudiants de licence qu'à leurs enseignants. Ces derniers ne sont pas les moins importants à considérer puisque c'est d'abord eux qu'il conviendrait de convaincre pour la mise en place de toute proposition innovante.

BIBLIOGRAPHIE

- BORN M. & WOLF E. (1980). *Principles of Optics. Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Oxford, Pergamon Press.
- COLIN P. (1997). *Passage de l'optique géométrique à l'optique ondulatoire : l'idée de sélection par l'aval de l'information lumineuse*. Mémoire de tutorat, Université Paris 7.
- DREYER Y. (1996). *Optique géométrique et ondulatoire : enquête sur les difficultés des étudiants de Licence*. Rapport de stage de didactique. Paris Centre, C.I.E.S.
- FAWAZ A. & VIENNOT L. (1986). Image optique et vision : enquête en classe de Première au Liban. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 686, pp. 1125-1146.
- KAMINSKI W. (1989). Conceptions des enfants et des autres sur la lumière. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 973-996.
- GALILI I. (1996). Student's conceptual change in geometrical optics. *International Journal of Science Education*, vol. 18, n° 7, pp. 847-868.
- GOLDBERG F.M. & MAC DERMOTT L. (1987). An investigation of student's understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror. *American Journal of Physics*, vol. 55, n° 2, pp. 108-119.
- GOODMAN J. W. (1972). *Introduction à l'optique de Fourier et à l'holographie*. Paris, Masson.
- MAURINES L. (1986). *Premières notions sur la propagation des signaux mécaniques : étude des difficultés des étudiants*. Thèse, Université Paris 7.
- MAURINES L. (1993). Mécanique spontanée du son. *Tréma*, n° 3-4, pp. 77-91.
- MAURINES L. (1995). Les étudiants et la phase propagative : résultats d'une enquête exploratoire. In G. Mary & W. Kaminsky (Éds), *Actes du cinquième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques*. Reims, Université de Reims-Champagne-Ardennes et IUFM de Reims, pp. 107-123.
- MAURINES L. (1997). Raisonnement spontané sur la diffraction. In J. Gréa (Éd.), *Actes du sixième séminaire national de la recherche en didactique de la physique, de la chimie et de la technologie*. Lyon, LIRDHiST, pp. 77-95.
- PFUNDT H. & DUIT R. (1994). *Student's Alternative Framework and Science Education*. Kiel, IPN.
- TIBERGHIAN A., JOSSEM E.-L. & BAROJAS J. (Éds) (1998). *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education (section C Student's knowledge and learning)* <http://www.physics.ohio-state.edu/jossem/ICPE/BOOKS.html>.
- VIENNOT L. (1996a). *Raisonnement en physique. La part du sens commun*. Louvain-la-Neuve, De Boeck Université.
- VIENNOT L. (1996b). *Le rayon lumineux en optique géométrique et en optique ondulatoire*. Rapport interne LDPEs, Université Paris 7.

ANNEXE

Le dispositif des trous d'Young peut s'analyser à partir du schéma suivant.



L'onde sphérique émise par la source ponctuelle S est diffractée par chacun des trous. Nous supposons les sources secondaires S_1 et S_2 ponctuelles. Ces sources sont cohérentes puisqu'elles sont issues de la même source ponctuelle S et elles émettent des ondes considérées comme sphériques. La cohérence temporelle des trains d'onde concernés est assurée (sauf « grande » différence de chemin optique entre les trajets SS_1P et SS_2P). L'intensité lumineuse en un point résulte de la superposition des deux ondes. Sa valeur dépend donc de leur phase relative au point P , laquelle se détermine en évaluant la différence des trajets (SS_1P et SS_2P) entre la source S et le point d'observation (il s'agit plus précisément des « chemins optiques », produits des distances parcourues par l'indice de l'air, mais cela revient au même ici). Bien entendu, un autre point d'observation amènerait à choisir d'autres tracés à partir de S_1 et S_2 .

Cet article a été reçu le 15/06/98 et accepté le 26/01/99.

Les difficultés d'étudiants post-bac pour une conceptualisation cohérente de la diffraction et de l'image optique

Coherent conceptualization of diffraction and optical imaging : university students' difficulties

Philippe COLIN, Laurence VIENNOT

Laboratoire de Didactique de la Physique dans l'Enseignement Supérieur
Université Denis Diderot, Case 7086
2, place Jussieu
75251 Paris cedex 05, France.

Résumé

Cet article vise à mettre en évidence les difficultés d'étudiants (deuxième et troisième années universitaires) à propos de situations d'optique qui s'analysent classiquement, dans l'enseignement, à l'aide de deux « modèles » à la fois : « géométrique » et « ondulatoire ». Les résultats de trois questionnaires confirment l'existence de problèmes importants pour une compréhension intégrée de ces deux approches. Ils nous amènent à souligner la nécessité de construire une présentation du contenu en cause – situations d'optique impliquant à la fois diffraction et imagerie optique – qui soit adaptée à ce public tout en restant cohérente. Quelques germes pour cette construction sont proposés ici : importance de la notion de

« groupement de rayons » et raisonnement « par l'aval », c'est-à-dire à partir du point d'observation.

Mots clés : difficultés des étudiants, diffraction, optique ondulatoire, optique géométrique, enseignement universitaire.

Abstract

This paper focuses on undergraduate students' difficulties when analysing situations in Optics which imply, in traditional teaching, two models : geometrical optics and wave optics. The findings of three questionnaires show that many students are a long way from a global understanding of these two models. We underline the necessity to build a content analysis of this subject both coherent and well adapted to undergraduate students. Some germs are proposed for this building : emphasis on the notion of « grouping of paths of light » and use of a « backwards » reasoning, starting from the arrival point of the light, in other words from its impact on the considered receiver.

Key words : students' difficulties, diffraction, wave optics, geometrical optics, university teaching.

Resumen

Este artículo pretende poner en evidencia las dificultades de los estudiantes (segundo y tercer año universitario) con relación a situaciones de óptica que se analizan clásicamente en la enseñanza, con la ayuda de los modelos : « geométrico » y « ondulatorio ». Los resultados de tres cuestionarios confirman la existencia de problemas importantes para una comprensión integrada de esas dos aproximaciones. Ello conduce a resaltar la necesidad de construir una presentación del contenido en causa – situaciones de óptica implicando a la vez difracción e imagerie óptica – que sea adaptada a ese público sin perder la coherencia. Algunos germenos para esta construcción son propuestos : importancia de la noción de « grupo de rayos » y razonamiento « por aval », es decir, a partir del punto de observación.

Palabras claves : dificultades de los estudiantes, difracción, óptica onduladora, óptica geométrica, enseñanza universitaria.

INTRODUCTION

L'analyse des difficultés des étudiants dans le domaine des sciences physiques a fait, ces vingt dernières années, l'objet de très nombreuses recherches en didactique (Pfundt & Duit, 1994 ; Tiberghien et al., 1998).

Beaucoup de ces difficultés ont été qualifiées de « communes » non seulement parce qu'elles étaient très répandues, mais aussi parce qu'elles semblaient liées davantage au sens commun qu'à l'enseignement précédemment reçu.

Sur certains domaines, pourtant, il est particulièrement difficile de s'en tenir à l'idée d'une origine non scolaire des difficultés observées, tant il s'agit d'une connaissance élaborée, distante de la vie quotidienne. Cela ne signifie pas que des tendances générales du sens commun ne s'y manifestent pas, comme on a pu l'observer maintes fois (Viennot, 1996a). Mais il est raisonnable de penser que, sur des sujets très académiques, il est particulièrement nécessaire, pour comprendre les réponses des étudiants, d'analyser le contenu de la physique, celui probablement dispensé lors de l'enseignement, celui présenté dans les manuels.

Cet article porte sur les difficultés observées chez des étudiants de deuxième et troisième années universitaires à propos de situations nécessitant une conceptualisation cohérente de la diffraction et de l'imagerie optique. Il s'agit de concilier deux manières de modéliser les phénomènes optiques longtemps présentées, dans l'enseignement, comme exclusives, ne se côtoyant que « à la limite ».

Certes, au niveau où nous nous situons, et même plus tard, chacune pose encore, en elle-même, de gros problèmes aux élèves. Alors que le dispositif optique est le « rassembleur » d'une information optique qui, sans lui, se diluerait dans l'espace, la lentille mince, par exemple, est souvent réduite au rôle de « retourneur » d'une image comprise comme voyageant en bloc de l'objet à l'écran (Fawaz & Viennot, 1986 ; Kaminski, 1989 ; Goldberg & Mac Dermott, 1987 ; Galili, 1996). Un cache sur une lentille mince, dans cette perspective, se traduit (à tort) par la prévision d'un trou dans l'image. La propagation des ondes conduit elle aussi à des difficultés (Maurines, 1986, 1993, 1995, 1997) du fait de la mise en œuvre par les étudiants d'un raisonnement où le signal s'apparente à un mobile répondant plus ou moins aux lois de la mécanique du solide. Nous faisons le choix ici, malgré la connaissance de ces lacunes dans la conceptualisation des étudiants, d'aller voir au delà, au carrefour de ces deux modèles, géométrique et ondulatoire.

C'est, bien sûr, à des élèves initiés à ces deux modèles que nous nous adressons. En France, quelques aspects de l'optique géométrique

sont d'abord introduits, ceci dès le collège et même parfois, en ce qui concerne les ombres, dès l'école primaire. Les premières notions sur les ondes lumineuses viennent avec l'introduction de la diffraction, en seconde actuellement, complétées en terminale par la présentation des interférences lumineuses. L'enseignement universitaire reproduit souvent la même séquence pour aboutir, au plus tard en licence, à un enseignement conséquent des ondes, des interférences et de la diffraction, à travers des dispositifs qui impliquent souvent des lentilles avec leur cortège plus ou moins familier de foyers, plans focaux, conjugaisons objet-image au sens de l'optique géométrique.

Tel est, en principe, c'est-à-dire dans l'intention des enseignants, l'acquis des étudiants dont nous avons recueilli les réponses et analysé les difficultés.

Notons que cette investigation se situe dans un cadre très proche de la pratique courante d'enseignement : elle comporte une question propre à l'enquête portant sur un montage classique de travaux pratiques, et deux questions d'examen, inspirées par les premiers constats de l'enquête et négociées avec un groupe d'enseignants en situation classique d'enseignement. Ce cadre d'interrogation, peu habituel en enquête sur les raisonnements communs, ne doit pas étonner ici : c'est bien aux raisonnements en situation d'enseignement classique, et aussi comme reflets des attentes des enseignants, que nous nous intéressons.

Dans une brève analyse du contenu physique en cause, nous soulignons qu'un point crucial, dans l'usage des tracés qui servent de support de raisonnement en optique, est celui du regroupement de tels tracés que l'on est amené à effectuer, regroupement essentiellement lié au point d'observation. Cet aspect nous sert ensuite de ligne d'analyse pour l'exploration des difficultés d'étudiants manifestées à propos des trois questions, que nous présenterons successivement. Une discussion des résultats introduira la nécessité d'une réflexion approfondie sur la présentation d'un tel contenu.

1. ANALYSE DES SITUATIONS EN TERMES DE REGROUPEMENTS DE « RAYONS »

La conjugaison objet-image en optique géométrique, dans le cadre du stigmatisme, s'exprime classiquement par le fait que tout rayon issu d'un point A de l'objet passe, à la sortie du dispositif optique, par un point image A'. L'image permet de reconnaître l'objet. Elle lui est homothétique. Nous n'en disons guère plus ici sur les « rayons » en question. Chacun sait au moins qu'ils sont censés représenter des trajets de la lumière, lesquels

sont rectilignes en l'absence d'obstacle et de changement d'indice. Insistons en revanche sur l'idée de groupement de rayons qui est intrinsèquement liée à celle de conjugaison objet-image : celle-ci implique que convergent au point image A' tous les rayons issus de A, du moins tous ceux qui passent dans le dispositif optique (encadré 1, (a)).

La relation entre ouverture diffractante (éclairée par une onde plane ou sphérique de fréquence donnée) et figure de diffraction (y compris des trous d'Young ou des réseaux) est tout autre : son analyse implique, cette fois, le regroupement de « rayons » issus de points différents de l'ouverture et parvenant en un point donné (encadré 1, (b)). Là encore, nous gardons le terme de « rayon » sans analyse serrée du contenu, nous contentant de répercuter un usage fréquent. De manière plus neutre, nous emploierons aussi le terme de « tracé ».

Rappelons enfin que ces tracés sont en relation simple avec la notion d'onde lorsqu'il s'agit d'onde plane ou sphérique puisqu'alors ils sont perpendiculaires à des surfaces d'ondes (lieu des points où la phase de l'onde est la même) bien définies.

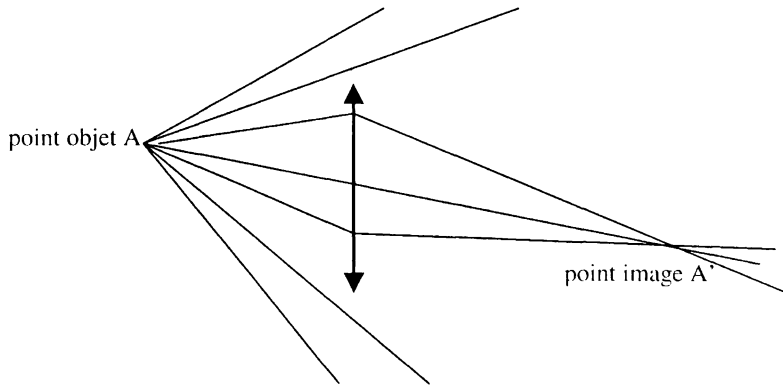
Selon la situation, il est nécessaire de faire fonctionner l'un, l'autre ou les deux types de regroupement. Dans tous les cas, l'analyse de ce que l'on observe en un point part, en quelque sorte, à « rebrousse-rayon » : c'est la position du plan d'observation (plan image conjugué ou plan focal image de la lentille) qui fixe le type de regroupement à opérer (Viennot, 1996b ; Colin, 1997).

Les trois situations analysées ici confrontent, de manière plus ou moins explicite, les étudiants à ce choix de regroupement. Dans chaque cas, nous situerons les réponses données par les étudiants par rapport aux réponses classiquement attendues que nous rappellerons pour chaque question. Nous n'envisagerons pas l'intervention d'un traitement analytique complet en termes d'optique de Fourier appliquée à la conjugaison optique comme aux situations classiques de diffraction (voir par exemple Goodman, 1972).

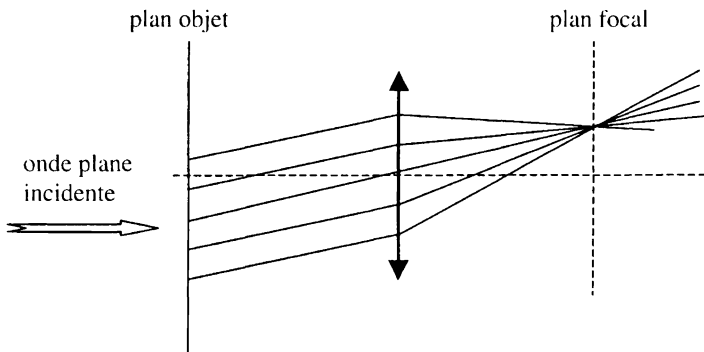
Notre analyse ne constitue qu'une étape vers une explicitation du contenu que pourrait viser l'enseignement, à propos de ce que l'on nomme souvent les modèles « géométrique » et « ondulatoire ». Nous comptons sur d'autres volets de notre recherche (analyse fine du contenu, analyse de manuels, enquête auprès d'enseignants) pour informer une tentative de formulation d'un contenu qui soit accessible à la population d'étudiants concernée tout en restant cohérente.

ENCADRÉ 1

Analyse classique de situations en termes de regroupements de « rayons » dans deux cas : conjugaison d'optique géométrique (a), figure de diffraction (b).



(a) Conjugaison objet-image en optique géométrique



(b) Obtention de la figure de diffraction d'un objet

2. PREMIÈRE MISE EN ÉVIDENCE

2.1. Présentation du questionnaire 1

Le texte de ce questionnaire (Dreyer, 1996) se fonde sur une situation courante en travaux pratiques d'optique : on « agrandit » une figure d'interférence par l'usage d'une lentille. On pourrait d'ailleurs, de la même manière, « agrandir » une figure de diffraction.

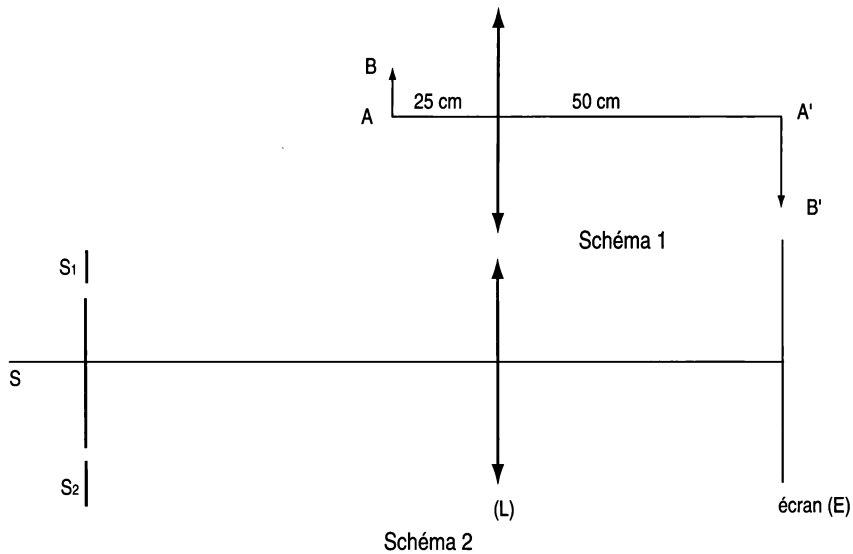
Il s'agit donc d'une invitation à expliciter le contenu d'une expérience classique d'enseignement.

Le texte du questionnaire est reproduit en encadré 2.

ENCADRÉ 2

Texte du questionnaire

Dans le dispositif représenté sur le schéma 2, la lentille (L) est telle qu'on obtient la correspondance objet réel-image réelle suivant le schéma 1. La lentille (L) est utilisée pour faire apparaître sur l'écran (E) des franges d'interférence dues aux sources ponctuelles cohérentes S_1 et S_2 .



L'échelle des schémas 1 et 2 selon l'axe horizontal est la même.
L'écartement des sources S_1 et S_2 N'EST PAS à la même échelle.

Questions

On observe sur (E) des franges nettes : ceci est-il l'image de quelque chose à travers (L) ?

Oui De quoi est-ce l'image ? Expliquer.

Non De quoi d'autre s'agit-il ? Expliquer.

2.2. Les réponses attendues au questionnaire 1 : « deux modèles »

Une réponse couramment considérée comme correcte est qu'on observe sur l'écran l'image de la distribution lumineuse (des franges d'interférences) dans le plan conjugué, à 25 cm en avant de la lentille. Il nous semble au moins aussi correct de dire que les franges observées sur l'écran, derrière la lentille, sont la distribution d'intensité lumineuse résultant des interférences entre les ondes diffractées en S_1 et S_2 (voir en annexe un rappel du principe du dispositif des trous d'Young). Chacune de ces ondes subit, dans la lentille, une transformation de type conjugaison optique (entre S_1 et son image S'_1 , respectivement S_2 et S'_2). Aux points situés à 25 cm en avant de la lentille, les deux ondes se superposent sans avoir, sauf exceptionnellement, la même phase. Remarquons pourtant que chacun de ces points ne constitue pas un objet ponctuel au sens habituel du terme puisqu'il n'est pas la source d'une onde sphérique.

En tout état de cause, l'argumentation doit mettre en œuvre à la fois un phénomène d'interférences typiquement ondulatoire et l'action de la lentille sur la lumière en relation avec la conjugaison optique.

Si l'on souhaite déterminer les deux trajets de lumière aboutissant au point d'observation M' , ce qui n'était pas demandé, le plus simple est de procéder comme suit.

La connaissance des positions des plans objet et image, telles que figurées sur le schéma 1 de l'énoncé de la question 1 (encadré 2), permet de construire l'image de tout point appartenant au plan objet en se servant, par exemple, du rayon central non dévié par la lentille. De là, on peut déduire tout trajet de lumière parvenant en M . La construction des trajets de la lumière issus de S_1 et S_2 qui aboutissent au point M' est donnée en figure 1. Elle s'effectue, en quelque sorte, à « rebrousse-rayon » : à partir de la connaissance du point M' de l'écran, on peut déterminer la position du point M et, enfin, effectuer les tracés correspondants entre la source et ce point M .

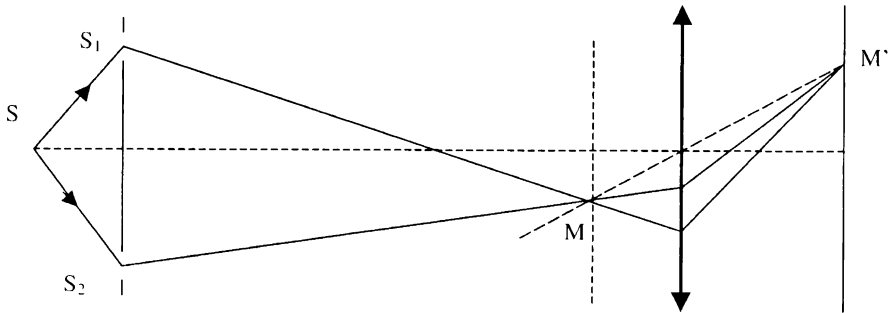


Figure 1 : **Schéma correct (non demandé) pour le dispositif du questionnaire 1**

L'égalité entre les deux chemins optiques correspondant aux deux trajets joignant M et M' assure que l'état interférentiel est le même en ces deux points. On comprend alors pourquoi la distribution d'intensité lumineuse sur l'écran est identique, au grandissement près, à celle que l'on obtiendrait en mettant un écran au plan objet.

Nous voyons donc que la situation proposée ne nécessite, à ce niveau d'analyse, aucun algorithme complexe. La difficulté réside plus ici dans la combinaison de deux situations classiques, dispositif des trous d'Young d'une part, « déviation » d'un trajet de lumière et formation d'une image par une lentille de l'autre. Ces questions appartiennent par tradition à deux approches différentes, optique ondulatoire et optique géométrique, ici impliquées dans une situation « mixte ». Il est alors nécessaire de mettre en oeuvre les deux approches afin de comprendre, d'une part, la sélection opérée sur tous les tracés que l'on peut envisager à partir des sources diffractantes S_1 et S_2 pour trouver ceux qui parviennent au point M' et, d'autre part, le statut de ce qui est observé sur l'écran.

2.3. Conditions d'enquête

Cette enquête porte sur un ensemble de 120 étudiants : 71 étudiants de classes de Mathématiques Spéciales Technologiques d'un lycée parisien et 49 étudiants de l'université Denis Diderot (Paris 7) en licence de physique. Les résultats très voisins de ces deux échantillons ont été regroupés. La durée de passation du questionnaire est de 15 minutes environ. Elle intervient après enseignement des interférences.

2.4. Analyse des réponses

Nous avons analysé ces réponses en nous centrant sur l'utilisation des modèles géométrique et/ou ondulatoire opérée par les étudiants pour justifier leurs réponses. La teneur de ces justifications nous intéresse plus, en l'occurrence, que l'affirmation ou la négation de la formation d'une image sur l'écran. Les catégories regroupant l'ensemble des réponses ont été construites relativement à cette problématique. Elles sont décrites de manière brève dans le tableau 1, assorties des taux d'occurrence correspondants. Les commentaires que nous citons dans l'analyse qui suit préciseront la signification de ces catégories.

catégorie de réponses	réponses brutes	
(1) « deux modèles » avec localisation du plan objet	OUI	11 %
(2) « deux modèles » mais pas de localisation du plan objet	OUI	13 %
(3) « un seul modèle (géométrique) »	OUI ou NON	18 %
(4) « un seul modèle (ondulatoire) »	NON	28 %
(5) autres justifications fausses	OUI ou NON	6 %
(6) sans justification ou sans réponse	OUI ou NON ou rien	24 %

Tableau 1 : Types de réponses au questionnaire 1 et pourcentages associés

Tout d'abord, nous constatons la faiblesse du pourcentage de réponses (24 % : catégories (1) et (2)) s'appuyant sur deux modèles. Parmi celles-ci, la moitié seulement (11 % : catégorie (1)) manifeste une compréhension, encore incomplète, de la conjugaison objet-image. Ensuite, nous remarquons la forte proportion d'étudiants (24 % : catégorie (6)) n'apportant aucune réponse ou des réponses sans justification.

Enfin, et c'est pour nous le résultat le plus important, nous notons que près d'un étudiant sur deux (46 % : catégories (3) et (4)) n'utilise qu'un seul des deux modèles pour tenter d'interpréter la situation.

Pour les étudiants qui ne s'appuient que sur l'optique géométrique (catégorie (3)), les franges présentes sur l'écran sont considérées comme une image et impliquent donc la recherche des sources lumineuses constituant l'objet. Les seules présentes étant les sources S_1 et S_2 , les étudiants donnent la réponse type suivante : « *c'est l'image des sources ponctuelles S_1 et S_2* ». Certains vont même jusqu'à écrire « *on observe l'image de l'objet AB* » marquant leur souci de trouver une source « matérielle » là où il n'en existe pas.

Les réponses négatives s'appuyant sur le modèle ondulatoire (catégorie (4)) font référence, plus ou moins explicitement, à la formation sur l'écran de quelque chose (figure ou franges d'interférences) sans liaison explicite avec la conjugaison mise en jeu en optique géométrique. Voici deux exemples de ce type de réponses :

« *Ce n'est pas une image, c'est une interférence entre les ondes lumineuses cohérentes.* »

« *Ce n'est pas une image, c'est une figure d'interférence entre les deux ondes lumineuses issues des foyers secondaires S_1 et S_2 .* »

Dans certaines de ces formulations apparaît le terme « rayon » dont on ne peut exclure qu'il soit associé à l'optique géométrique, mais le rôle de la lentille est passé sous silence :

« *Ce n'est pas une image, ce sont des franges d'interférences dues à l'intersection de deux rayons provenant de S_1 et S_2 .* »

« *Ce n'est pas une image. On visualise les interférences entre les rayons issus de S_1 et ceux issus de S_2 sur l'écran.* »

La difficulté de la synthèse entre optiques géométrique et ondulatoire peut même s'exprimer par une assez brutale négation du rôle de la lentille, uniquement pensée comme système « imageur » :

« *Non, ce n'est pas une image. Pour qu'il y ait une image d'un objet sur l'écran par rapport à la lentille, il faudrait que l'objet soit placé à 25 cm avant la lentille. Donc la lentille n'a pas de rôle. On voit les franges de l'interféromètre d'Young sur l'écran.* »

Enfin elle peut se traduire graphiquement, comme sur le schéma reproduit en figure 2.

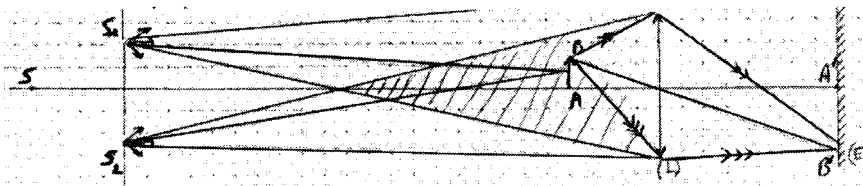


Figure 2 : **Un schéma en réponse au questionnaire 1**
Disjonction de deux types de construction

Sur ce schéma, fourni spontanément par l'étudiant, aucune relation n'est suggérée entre la partie gauche représentant une situation d'interférences et la partie droite reproduisant la construction de l'image A'B' de l'objet AB.

D'autres constructions du même type seront largement rencontrées à propos des deux questionnaires analysés plus bas.

2.5. Bilan pour le questionnaire 1

Nous avons souligné les difficultés inhérentes à la situation proposée : bien que celle-ci soit très classique, elle n'en est pas pour autant simple à analyser puisqu'elle combine deux situations, l'une typique d'optique ondulatoire – le dispositif des trous d'Young – l'autre typique de l'optique géométrique – la formation d'une image par une lentille mince convergente. Les étudiants sont donc amenés à mettre en oeuvre les deux modèles.

Outre la faiblesse du pourcentage de réponses faisant apparaître clairement les deux modèles (11 %), nous retiendrons que près d'un étudiant sur deux ne semble utiliser qu'une seule approche à la fois, géométrique ou ondulatoire, et ne peut donc pas parvenir à une synthèse cohérente. Une difficulté apparaît ici liée au caractère non classique de « l'objet » : franges d'interférences non « matérialisées ».

En matière de schéma, rien n'était demandé. Il suffisait de s'appuyer sur la définition de la conjugaison optique objet-image et, à la limite, un schéma était susceptible de compliquer les choses. Celui que nous avons cité en montre bien toute la difficulté : comment utiliser les mêmes tracés dans deux types de construction ? Les tracés utilisés pour interpréter l'état interférentiel d'un point du plan conjugué de l'écran (en figure 2) s'arrêtent net, dans ce schéma, lorsqu'il faut aborder la lentille pour poursuivre la construction.

Les questionnaires suivants mettent l'accent, cette fois, sur les constructions de schémas et donc sur les regroupements de tracés. En revanche, ils évitent la difficulté signalée sur le caractère non classique de « l'objet ». La conjugaison optique absente dans la situation précédente est cette fois pleinement assurée (questionnaire 2) par la présence d'un objet bien matériel : une diapositive.

3. IMAGE GÉOMÉTRIQUE D'UN OBJET DIFFRACTANT : QUESTIONNAIRE 2

Le cadre de l'enquête est celui d'un examen (juin 1996) après un enseignement de licence sur les ondes, dont la diffraction a constitué l'un des derniers sujets traités. L'essentiel du problème posé porte sur le phénomène de diffraction observé dans le plan focal d'une lentille. La

formation de l'image géométrique n'intervient que comme question préliminaire (c'est sur elle que portera notre analyse) et comme question finale où l'on demande de décrire l'aspect de l'image obtenue après un filtrage spatial. L'analyse s'appuie sur les réponses de 169 étudiants.

3.1. Énoncé du questionnaire 2

L'encadré 3 donne le texte du questionnaire 2.

ENCADRÉ 3

Image géométrique d'un objet diffractant : questionnaire 2

Une diapositive représentant un motif géométrique est placée, comme l'indique le schéma ci-dessous, à une distance $p = 75$ cm d'une lentille convergente de distance focale $f = 50$ cm, perpendiculairement à l'axe optique de la lentille. La diapositive est éclairée, sous incidence nulle, par une onde plane monochromatique (longueur d'onde $\lambda = 500$ nm).

L'image de la diapositive se forme sur un écran placé à une distance d de la lentille. Sur un schéma analogue à celui du texte, tracer les trajectoires d'au moins trois rayons issus de la diapositive et convergeant en un point P de l'écran, en dehors de l'axe optique.

3.2. Réponse attendue

L'objet « flottant » que constituaient les franges d'interférences du questionnaire précédent, se trouve remplacé ici par un objet tout à fait matériel, une diapositive. Les deux modèles géométrique et ondulatoire

interviennent conjointement : chaque point de la diapositive constitue par diffraction un point dont la lentille fournit l'image optique (nous ne pouvons pas ici entrer dans le détail des mécanismes intervenant au sein de la diapositive et nous nous contenterons de rappeler qu'il s'agit d'une approximation dont les conditions de validité sont satisfaites dans la situation présentée). Voici donc bien en oeuvre deux approches : diffraction et imagerie optique.

Classiquement, la construction de l'image optique s'appuie sur le tracé de rayons particuliers dont nous connaissons la marche. Le tracé d'un seul rayon suffit pour trouver le point objet correspondant au point image P puisque les positions des plans image et objet sont connues. On attend donc, par exemple, le tracé du rayon (1) passant par le centre optique de la lentille ou d'un rayon (2) passant par un foyer (figure 3). Les tracés des autres rayons demandés devant passer par les points objet et image peuvent ensuite être déterminés grâce à la seule connaissance du couple objet-image en cause.

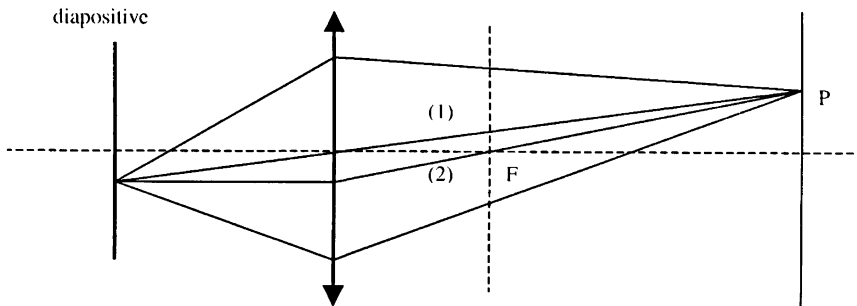


Figure 3 : Une réponse correcte au questionnaire 2

3.3. Analyse des réponses

Les résultats sont donnés dans le tableau 2.

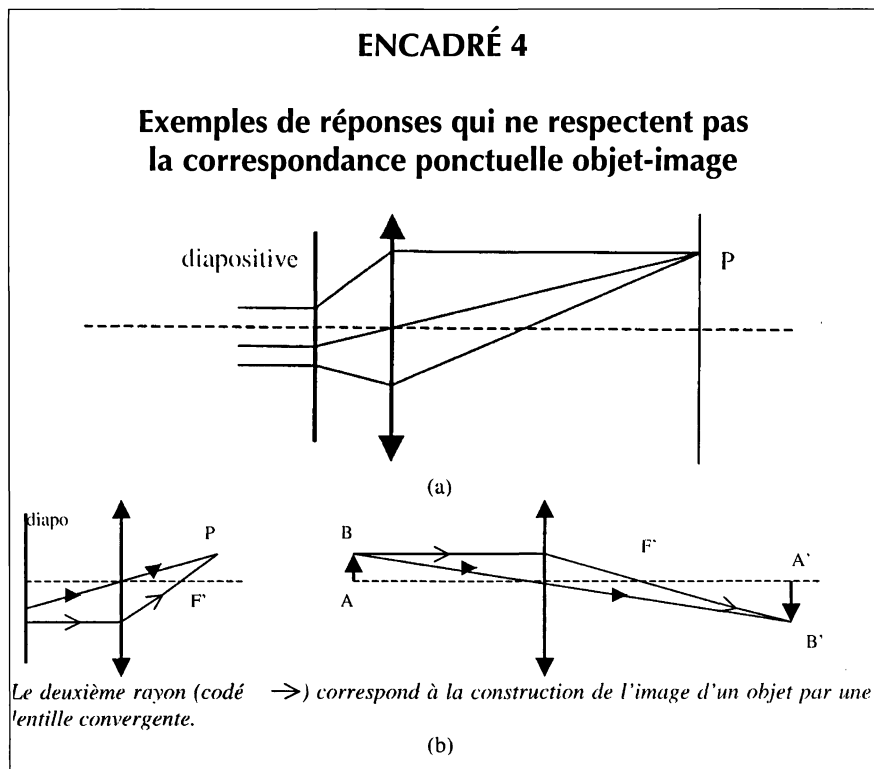
Construction correcte	27 %
Construction incomplète (traçage de deux rayons seulement)	2 %
Construction fautive	59 %
Sans réponse	12 %

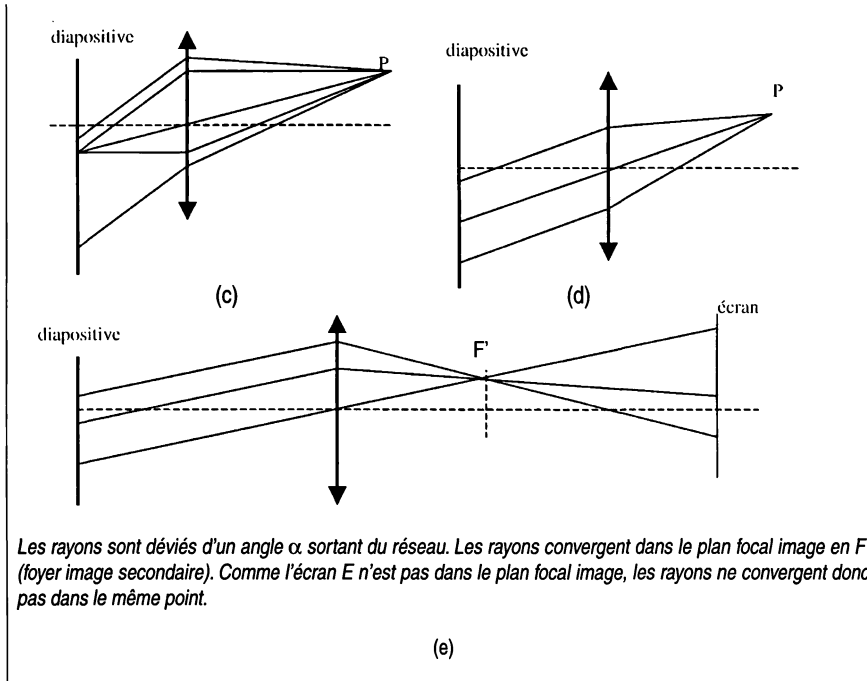
Tableau 2 : Catégories de réponses au questionnaire 2 et pourcentages associés

Seul un étudiant sur quatre effectue correctement la construction.

L'examen des constructions fausses (59 %) autorise un premier constat : dans la presque totalité de ces cas (54 % du total), la correspondance point à point n'est pas réalisée : pour plus d'un étudiant sur deux, l'idée de groupement de rayons issus d'un point et convergeant en un autre point n'a pas prévalu dans cette situation qui implique aussi la diffraction. L'encadré 4 rassemble des exemples de telles réponses.

Un aspect commun à ces schémas est la convergence vers un point P au delà de la lentille. Cependant les tracés en cause ne proviennent pas tous du même point de la diapositive. Dans la moitié de ces réponses (soit un quart de l'effectif total : 27 %), les rayons incidents proviennent de points différents mais respectent certaines règles de l'optique géométrique (réponse (a)). La réponse (b) montre que ce n'est pas faute d'une connaissance du schéma prototypique. Seulement, cette connaissance n'a pas installé l'essentiel, c'est-à-dire le critère auquel est astreint le groupement des rayons convergeant au point image P : tous les rayons issus du point objet, et rien que ceux-là, convergent au point image.





Pour l'autre moitié (23 % de l'effectif total), c'est la nécessité de parallélisme des rayons incidents qui semble avoir prévalu (réponse (d)). Tous les rayons incidents sur la lentille sont parallèles entre eux, comme lorsque l'on étudie la diffraction et elle seule. Ces rayons convergent en un point qui est censé appartenir à l'image de la diapositive formée par la lentille.

La réponse (e), inadaptée mais correcte, rappelle d'ailleurs que si l'on est parti comme d'habitude de la diapositive avec des rayons parallèles, il est bien difficile d'assurer ensuite la convergence requise au point P.

La réponse (c) illustre une catégorie minoritaire de réponses (4 % de l'effectif total), intermédiaire entre les types de réponses (a) et (d), où tout irait bien sans l'adjonction de rayons parallèles entre eux, et donc issus de points différents de la lentille.

3.4. Bilan pour le questionnaire 2

Nous avons pensé que la mise en oeuvre de la conjugaison optique serait facilitée du fait du remplacement de l'objet « flottant » du premier questionnaire, les franges d'interférence, par un objet matériel, la diapositive

en l'occurrence. Or, dans ces conditions apparemment plus favorables, la mise en œuvre de la conjugaison optique apparaît ici comme très perturbée par la situation de diffraction.

Un étudiant sur cinq va jusqu'à faire subir à un ensemble de rayons parallèles, regroupement classique en étude de diffraction, le sort normalement assigné à un ensemble de rayons émis par un point unique de la diapositive, dont la lentille formerait l'image sur l'écran si celui-ci se trouvait dans le plan conjugué de la diapositive.

Du fait de la complexité de l'onde diffractée par l'objet, il est nécessaire, pour l'analyser, d'effectuer une sélection bien précise des tracés envisagés. Cette idée, et le critère de sélection à mettre en œuvre, semblent bien peu présents dans les réponses d'étudiants devant cette situation perturbante : introduction d'une question typique d'optique géométrique dans un contexte « fortement ondulatoire ».

4. FIGURE DE DIFFRACTION D'UN OBJET : QUESTIONNAIRE 3

Si la diffraction apparaît perturbante dans le questionnaire 2, il est néanmoins tout à fait indispensable de la prendre en compte. En effet, sans une action de la diapositive sur l'onde plane, on voit mal comment l'onde, au delà de la diapositive, pourrait porter une information sur celle-ci. S'interroger sur la nature de cette action est alors essentiel. Les nombreux « rayons » obliques observés sur les schémas relatifs à la question précédente suggèrent que quelque chose du registre de la diffraction a été pris en compte, mais quoi ? Les questions proposées ici éclairent la façon dont les étudiants comprennent ce point. On notera que la démarche proposée dans cette série d'items procède, comme nous l'indiquions plus haut, à « rebrousse-rayons », c'est-à-dire de l'aval (le point M) vers l'amont (les trous).

Il faut aussi remarquer que cette situation, banale entre toutes dans un cours de licence qui concerne la diffraction, n'est pas si anodine que cela. En effet, tout se passe « normalement » jusqu'à la lentille : comme d'habitude en diffraction, on va se trouver en présence de tracés parallèles issus des divers points de la diapositive. En aucun cas, ceux-ci ne symbolisent une onde plane, un plan perpendiculaire à leur direction n'est pas davantage un plan d'onde : ne passe-t-on pas force heures d'enseignement à calculer les déphasages associés ? Mais la lentille va être, en général sans beaucoup d'explications préalables de la part du corps enseignant, considérée comme faisant sur ces « rayons » le même travail

que si ils appartenait à une onde plane : chacun est dévié vers le foyer secondaire correspondant. L'analyse porte sur les réponses de 251 étudiants de licence données à l'occasion d'un partiel sur les ondes (mai 1996).

4.1. Énoncé des questions (questionnaire 3)

L'énoncé des questions sur lesquelles porte l'analyse est donné en encadré 5.

ENCADRÉ 5

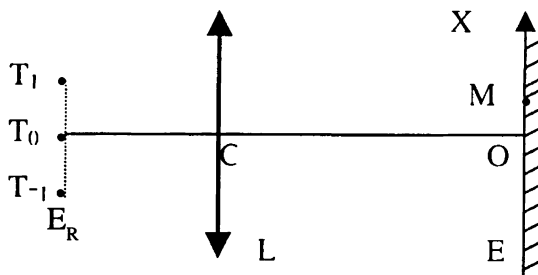
Figure de diffraction d'un objet : questionnaire 3 (présentation de la situation et questions)

Un écran (E_R) est percé de trois trous identiques T_0 , T_1 , T_{-1} , séparés par une distance l . Une lentille convergente (L) de distance focale f est disposée à la suite de l'écran (E_R), son axe optique coïncidant avec l'axe de symétrie de (E_R) perpendiculaire à cet écran.

Un autre écran (E) coïncide avec le plan focal image de (L)

On éclaire l'écran (E_R) avec une onde plane monochromatique de longueur d'onde λ , se propageant selon la direction perpendiculaire à l'écran.

On s'intéresse à la répartition de l'intensité lumineuse reçue sur l'axe OX de l'écran (E) (voir le schéma).



Les trois trous très fins sont assimilables à des sources ponctuelles.

On considère un point M sur OX , d'abscisse X .

Questions

- 1)
 - a) Représenter sur un schéma, identique à celui du texte, les trajets des pinceaux lumineux issus des trous et qui parviennent en M.
 - b) Expliquer votre réponse.
 - c) Quel phénomène, au niveau des trous, permet que la lumière suive effectivement ces trajets ?
- 2) Calculer l'amplitude lumineuse en M, à un facteur de phase près, en fonction de X et de l'amplitude U_0 de l'onde au niveau de chaque trou. Justifier le principe de ce calcul.

4.2. Réponses attendues

Une construction correcte (question 1a) est donnée figure 4.

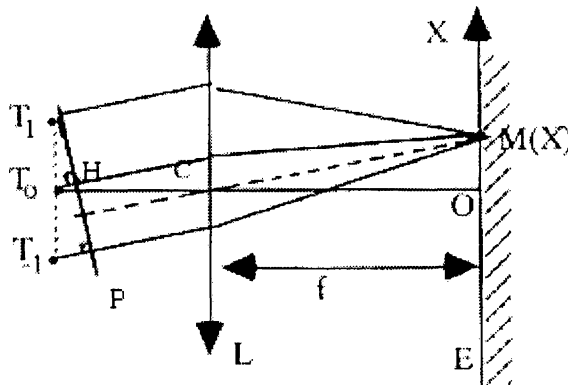


Figure 4 : **Schéma attendu*** en réponse au questionnaire 3 (*voir le texte)

Pour être jugée correcte, la réponse doit faire figurer le tracé CM joignant le centre C de la lentille au point M d'observation. En effet (question 1b), seuls les rayons parallèles à CM parviennent en M car M est un foyer secondaire. La justification de la construction doit donc faire référence aux propriétés des lentilles. Notons qu'en toute rigueur, il n'existe pas de pinceau lumineux issu d'un trou supposé ponctuel et convergeant strictement au point M mais bien un tracé unique. Si un pinceau issu d'un trou est tracé, il doit converger au point image de ce trou et non en M.

Pour justifier les trajets à partir des trous (question 1c), l'étudiant doit mentionner la diffraction : les trous sont suffisamment fins pour renvoyer, par diffraction, de la lumière dans un large éventail de directions ; l'ensemble « lentille-point M de l'écran » sélectionne l'une d'entre elles.

Le calcul du déphasage entre les ondelettes parvenant au point M (question 2) est très classique. Il utilise la relation de proportionnalité liant phase de l'ondelette et chemin optique parcouru. On se ramène donc pour calculer la différence de phase entre les ondelettes issues de deux trous, par exemple de T_0 et T_1 , au calcul de la différence de chemin optique pour aller de T_0 à M et de T_1 à M (figure 4). Cette différence est celle existant entre les distances de chaque trou à un plan P perpendiculaire à la direction commune des rayons incidents considérés (figure 4). En effet, au delà d'un tel plan, les chemins optiques qui restent à parcourir jusqu'à M sont tous égaux du fait des propriétés de la lentille.

4.3. Analyse des réponses au questionnaire 3

4.3.1. Question 1 du questionnaire 3

Quelques chiffres seulement suffiront à situer la difficulté globale ressentie par les étudiants, pour cette première question, que l'on pourrait considérer comme élémentaire à ce niveau d'études : seul un étudiant sur deux répond correctement aux questions 1a et 1b, et mentionne la diffraction en réponse à la question 1c.

Parmi les justifications correctes en 1b, on trouve chez un peu moins de 10 % des étudiants l'idée que ces tracés parallèles ont été sélectionnés par le choix du point M et la lentille.

Les justifications incorrectes, voire fausses, ou relatives à des constructions fausses, en question 1b et 1c concernent près d'un tiers des étudiants (respectivement 37 % et 28 %).

Pour ce qui concerne la construction demandée, nous retenons plus particulièrement les justifications fausses (14 % du total), qui accompagnent des tracés parallèles dessinés à la sortie des trous (29 % de l'effectif total ; ces tracés sont conformes, entre les trous et la lentille, à la réponse correcte). Y sont présentes les idées suivantes illustrées par les réponses de l'encadré 6 :

- les rayons incidents sur la lentille viennent de l'infini, « de la même source », « traversant tout droit » les trous (encadré 6 (a), (b), (c), (d)) ;
- chaque « rayon » émergeant d'un trou est *la (seule ?) suite* du rayon qui est arrivé sur ce trou, comme en témoignent les expressions « dévié », « déviation », ou des symbolisations continues (encadré 6 (e), (f), (g)).

Cette dernière idée, présente également en accompagnement de constructions fausses, concerne au total 14 % des étudiants.

4.3.2. Question 2 du questionnaire 3

Les aspects de réponses que l'on vient de mettre en évidence (question 1) trouvent un écho atténué dans les réponses à la question 2. Celle-ci prend un tour plus calculatoire, et d'ailleurs, sur 240 étudiants n'ayant pas proposé (à l'instar de 11 autres) une solution purement calculatoire s'appuyant sur l'optique de Fourier, 80 % parviennent à un résultat correct, 57 % accompagnant ceci d'un schéma correct, tandis que 20 % s'accommodent très bien d'un schéma faux pour aboutir à ce même résultat correct.

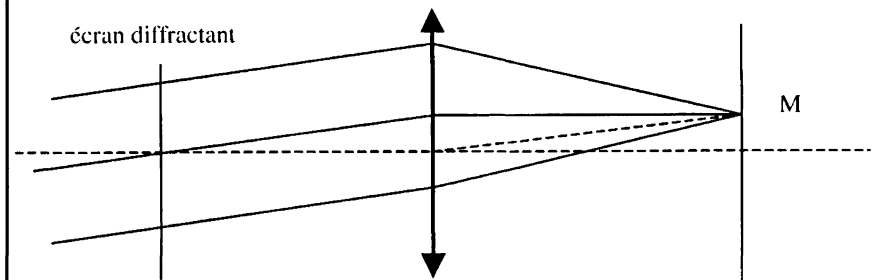
Seuls 19 % des étudiants donnent une justification de leur calculs. Le pourcentage de justifications réellement satisfaisantes reste difficile à estimer. Les justifications par une discussion de chemins optiques parcourus débouche sur des difficultés de mise en œuvre de résultats d'optique géométrique. Le théorème de Malus (voir par exemple Born & Wolf, 1980), souvent évoqué, met alors en scène des surfaces d'onde. Or on a bien dit qu'il n'y en avait guère de disponibles dans les parages. Revoilà la question soulevée plus haut : pour chaque « rayon » diffracté, on admet que la lentille fait comme s'il s'agissait d'un représentant d'une onde plane, mais l'ensemble concerné n'en constitue pas une.

ENCADRÉ 6

Quelques idées fausses à propos de la diffraction

Les rayons viennent de l'infini comme ceux d'une onde plane et traversent les trous tout droit.

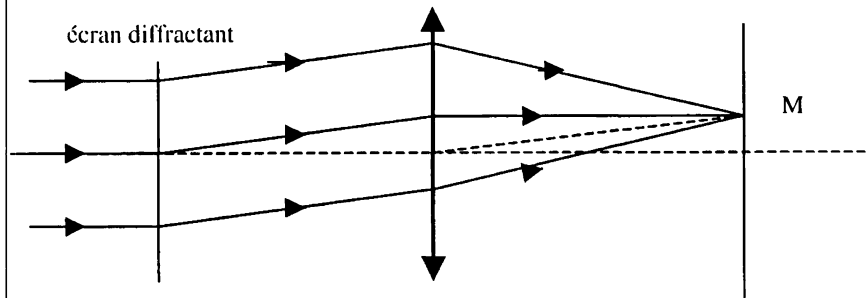
- (a) « Le faisceau lumineux provenant d'une source placée à l'infini, tous les rayons suivent un chemin parallèle les uns aux autres. Les trous laissent passer des rayons qui suivent toujours la même direction. »
- (b) « Le schéma définit un réseau à trois fentes (...) »



- (c) « Tous les pinceaux lumineux issus des trois trous convergent en un même point M de l'écran. En effet, ces trois faisceaux proviennent de l'infini (...) »
- (d) « L'écran E est dans le plan focal image de la lentille L. Donc le point M est l'image d'un objet venant de l'infini (...) »

Chaque rayon émergeant d'un trou est la suite du rayon qui est arrivé sur ce trou : le rayon est « dévié ».

- (e) « Les rayons incidents sont parallèles à l'axe et sont déviés d'un même angle. Tous les rayons émergents arrivent sur la lentille parallèles entre eux. »



- (f) « On considère les rayons parallèles qui sont déviés dû au phénomène de diffraction d'un même angle car ils sont parallèles avant d'atteindre les fentes (...) »
- (g) « Les rayons lumineux arrivant sur les fentes sont parallèles entre eux. Au passage des fentes, ces rayons sont déviés mais restent parallèles entre eux. »

4.4. Bilan pour le questionnaire 3

Nous nous proposons ici de mieux cerner la façon dont les étudiants prennent en compte le phénomène de diffraction, en centrant notre analyse sur les regroupements de « rayons » mis en jeu lors de l'obtention d'une figure de diffraction. Nous retenons les idées essentielles suivantes.

L'idée de sélection de tracés, fortement liée à celle de structure complexe de l'onde diffractée, semble souvent absente : ne sont pris en compte que les seuls tracés figurant sur les schémas, et rien, dans la plupart des réponses, ne suggère que chaque trou diffracte de la lumière dans un large éventail.

Cette absence peut conduire, d'une part, à une interprétation erronée de la diffraction comme une déviation des rayons incidents vers la direction des « rayons » diffractés représentés, d'autre part, à assimiler « rayons » diffractés dans une direction donnée et onde plane, assimilation déjà relevée dans plusieurs manuels d'enseignements (Colin, 1997).

De plus, l'absence d'un questionnement sur le statut des tracés amène certains étudiants à utiliser les règles de l'optique géométrique, par exemple celles données par le théorème de Malus, hors de leur cadre d'application : tous les tracés deviennent ainsi des rayons lumineux de l'optique géométrique, dont le parallélisme suggère l'existence d'une onde plane.

5. DISCUSSION

Le questionnaire portant sur le dispositif des trous d'Young (questionnaire 1) a mis en évidence combien il était difficile pour beaucoup d'étudiants de faire la synthèse des approches géométrique et ondulatoire. Près d'un étudiant sur deux apporte des réponses ne s'appuyant que sur un seul modèle, géométrique ou ondulatoire.

La « non-matérialité » de l'objet, en l'occurrence des franges d'interférence, ayant pu constituer un obstacle important, nous avons poursuivi notre enquête en utilisant un objet bien matériel, une diapositive (questionnaire 2). Même dans ce cas, la conjugaison optique, principe de base de la formation de l'image géométrique d'un objet, n'est pas mise en oeuvre par la moitié des étudiants. Elle se réduit pour beaucoup à la convergence au point image de « rayons » de provenance variée. Ceci est bien éloigné d'une compréhension en termes de regroupement de « rayons » issus du point objet et convergeant au point image.

La dernière partie de l'enquête (questionnaire 3) nous a permis de mettre en évidence les difficultés d'un grand nombre d'étudiants concernant le phénomène de diffraction, au regard plus particulièrement de la structure de l'onde diffractée et du statut des « rayons » représentés sur leurs schémas.

Nous avons souligné les points suivants :

- absence de l'idée de sélection des tracés suivant le point d'observation choisi, sans doute en étroite liaison avec la non-prise de conscience de la structure complexe de l'onde diffractée, si l'on en juge par la seule prise en compte des « rayons » diffractés suivant une direction donnée ;

– aucun questionnement sur le statut des tracés, ce qui amène à identifier ceux-ci systématiquement aux rayons lumineux de l'optique géométrique ; cette identification permet d'interpréter les faits suivants : d'une part présentation erronée de la diffraction comme une déviation des rayons incidents vers la direction (unique) des « rayons » diffractés représentés, d'autre part, assimilation des « rayons » diffractés dans une direction donnée à une onde plane, l'optique géométrique étant mise en oeuvre hors de son domaine de validité.

Au delà du constat habituel sur la distance entre les performances calculatoires des élèves et leur niveau de compréhension des phénomènes en cause, il nous semble important de revenir à la fois sur la nature des difficultés conceptuelles des étudiants et sur un éclairage des contenus enseignés qui réponde de manière appropriée à ces difficultés.

Quand tant d'études sur les difficultés en optique géométrique nous apprennent la prégnance d'un modèle global du transport de l'information lumineuse, l'objet émettant une image de lui-même qui se transporte en bloc jusqu'à l'écran, quand plus largement on sait que les raisonnements les plus répandus dans la physique commune prennent le format d'une histoire, alors on ne peut s'étonner qu'il soit difficile d'analyser des situations par procédure de tri dans un tout complexe, et encore plus d'effectuer ce tri à « rebrousse-rayons », c'est-à-dire comme si l'on remontait le temps.

Autre aspect des difficultés : les « rayons », chemins de lumière, prennent eux-mêmes le statut de héros de l'histoire, leurs tracés en deviennent le compte rendu. Cette vision qui réduit l'histoire à la géométrie laisse en route une partie de l'information : la phase. Elle n'autorise qu'une seule histoire pour un dessin donné : ainsi, des tracés parallèles représentent une onde plane, ils « viennent » de l'infini, nécessairement.

Ces résultats et ces réflexions nous semblent poser très fortement la question de la présentation adoptée, dans l'enseignement, pour les deux approches des phénomènes optiques impliqués : géométrique et ondulatoire. Quelle place fait-on traditionnellement, quel éclairage convient-il d'adopter, pour les aspects que nous venons de soulever ? Pourquoi laisser penser, par une symbolisation identique, qu'avant et après un trou d'Young, il s'agit du même rayon ? Comment signale-t-on, justifie-t-on, qu'un même tracé de « rayon diffracté » n'appartenant, de manière évidente, à aucune onde plane ou sphérique, se calque ensuite, à travers la première lentille rencontrée, sur le tracé d'un « rayon d'optique géométrique » qui serait lui associé à une onde plane ou sphérique ? Y a-t-il lieu de souligner que le statut d'un tracé dépend hautement de l'ensemble de tels tracés dans lequel on a décidé de l'inclure pour l'analyse d'un aspect donné de la situation ?

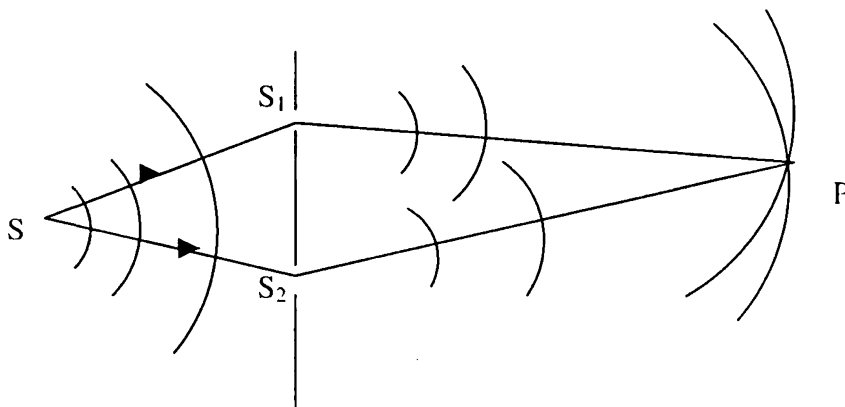
Telles sont les questions, au centre de nos recherches présentes, qu'il nous semble essentiel de prendre en compte si l'on veut définir, pour les situations impliquant à la fois diffraction et imagerie optique, un niveau de conceptualisation qui soit cohérent, moins complexe qu'une optique de Fourier généralisée, et adapté aussi bien aux étudiants de licence qu'à leurs enseignants. Ces derniers ne sont pas les moins importants à considérer puisque c'est d'abord eux qu'il conviendrait de convaincre pour la mise en place de toute proposition innovante.

BIBLIOGRAPHIE

- BORN M. & WOLF E. (1980). *Principles of Optics. Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Oxford, Pergamon Press.
- COLIN P. (1997). *Passage de l'optique géométrique à l'optique ondulatoire : l'idée de sélection par l'aval de l'information lumineuse*. Mémoire de tutorat, Université Paris 7.
- DREYER Y. (1996). *Optique géométrique et ondulatoire : enquête sur les difficultés des étudiants de Licence*. Rapport de stage de didactique. Paris Centre, C.I.E.S.
- FAWAZ A. & VIENNOT L. (1986). Image optique et vision : enquête en classe de Première au Liban. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 686, pp. 1125-1146.
- KAMINSKI W. (1989). Conceptions des enfants et des autres sur la lumière. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 973-996.
- GALILI I. (1996). Student's conceptual change in geometrical optics. *International Journal of Science Education*, vol. 18, n° 7, pp. 847-868.
- GOLDBERG F.M. & MAC DERMOTT L. (1987). An investigation of student's understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror. *American Journal of Physics*, vol. 55, n° 2, pp. 108-119.
- GOODMAN J. W. (1972). *Introduction à l'optique de Fourier et à l'holographie*. Paris, Masson.
- MAURINES L. (1986). *Premières notions sur la propagation des signaux mécaniques : étude des difficultés des étudiants*. Thèse, Université Paris 7.
- MAURINES L. (1993). Mécanique spontanée du son. *Tréma*, n° 3-4, pp. 77-91.
- MAURINES L. (1995). Les étudiants et la phase propagative : résultats d'une enquête exploratoire. In G. Mary & W. Kaminsky (Éds), *Actes du cinquième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques*. Reims, Université de Reims-Champagne-Ardennes et IUFM de Reims, pp. 107-123.
- MAURINES L. (1997). Raisonnement spontané sur la diffraction. In J. Gréa (Éd.), *Actes du sixième séminaire national de la recherche en didactique de la physique, de la chimie et de la technologie*. Lyon, LIRDHiST, pp. 77-95.
- PFUNDT H. & DUIT R. (1994). *Student's Alternative Framework and Science Education*. Kiel, IPN.
- TIBERGHIAN A., JOSSEM E.-L. & BAROJAS J. (Éds) (1998). *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education (section C Student's knowledge and learning)* <http://www.physics.ohio-state.edu/jossem/ICPE/BOOKS.html>.
- VIENNOT L. (1996a). *Raisonnement en physique. La part du sens commun*. Louvain-la-Neuve, De Boeck Université.
- VIENNOT L. (1996b). *Le rayon lumineux en optique géométrique et en optique ondulatoire*. Rapport interne LDPEs, Université Paris 7.

ANNEXE

Le dispositif des trous d'Young peut s'analyser à partir du schéma suivant.



L'onde sphérique émise par la source ponctuelle S est diffractée par chacun des trous. Nous supposons les sources secondaires S_1 et S_2 ponctuelles. Ces sources sont cohérentes puisqu'elles sont issues de la même source ponctuelle S et elles émettent des ondes considérées comme sphériques. La cohérence temporelle des trains d'onde concernés est assurée (sauf « grande » différence de chemin optique entre les trajets SS_1P et SS_2P). L'intensité lumineuse en un point résulte de la superposition des deux ondes. Sa valeur dépend donc de leur phase relative au point P , laquelle se détermine en évaluant la différence des trajets (SS_1P et SS_2P) entre la source S et le point d'observation (il s'agit plus précisément des « chemins optiques », produits des distances parcourues par l'indice de l'air, mais cela revient au même ici). Bien entendu, un autre point d'observation amènerait à choisir d'autres tracés à partir de S_1 et S_2 .

Cet article a été reçu le 15/06/98 et accepté le 26/01/99.

Les étudiants, la diffraction de Fraunhofer et la formation des images en éclairage cohérent

Students, the Fraunhofer diffraction and the coherent illumination optical imaging

Laurence MAURINES

IUFM de Créteil
LDPES, Université Denis Diderot Paris 7, case 7086
2 Place Jussieu, 75251 Paris cedex 05, France.

Résumé

Cette recherche analyse comment les étudiants interprètent le schéma utilisé dans l'étude de la diffraction de Fraunhofer et envisagent la formation des images dans des situations relevant de l'optique physique. Elle confirme leur tendance à employer un raisonnement de nature « géométrique » dans une situation ondulatoire. Ce raisonnement entraîne que l'image d'une source ponctuelle à l'infini est située derrière le plan focal image de la lentille lorsque la diffraction ne peut être négligée, que les images de la source et d'un objet transparent éclairé n'existent pas simultanément ou sont confondues. Elle révèle de plus une tendance à considérer qu'il n'y a pas d'image en présence de diffraction.

Mots clés : *raisonnement commun, université, image, diffraction, éclairage cohérent.*

Abstract

This research analyses the ways students consider the ray diagram used in Fraunhofer diffraction and cope with the formation of images in situations where wave optics need to be used. It validates the hypothesis concerning the students' tendency to reason in a wave situation as if it was a geometric situation. Consequently, the image of a point source located at infinity is placed behind the image focus of the lens when diffraction has to be considered, the images of the source and of an illuminated transparent object cannot exist simultaneously or are confused. A tendency to consider that diffraction and optical imaging are two separate phenomena is revealed.

Key words : *common reasoning, university, image, diffraction, coherent illumination.*

Resumen

Esta investigación analiza cómo los estudiantes interpretan el esquema utilizado en el estudio de la difracción de Fraunhofer y conciben la formación de las imágenes en situaciones relevantes de la óptica física. La misma confirma su tendencia a emplear un razonamiento de naturaleza « geométrica » dentro de una situación ondulatoria. Este razonamiento deduce que la imagen de una fuente puntual en el infinito, está situada detrás del plano focal de la imagen de la lente cuando la difracción no puede ser despreciada, y que las imágenes de la fuente y de un objeto transparente iluminada, no existen simultáneamente o están confundidos. Además revela una tendencia a considerar que no hay imagen en presencia de difracción.

Palabras claves : *razonamiento común, universidad, imagen, difracción, iluminación coherente.*

1. INTRODUCTION

Dans une précédente recherche (Maurines, 1997a, 1999a), nous avons analysé les difficultés rencontrées par les étudiants lors de la modélisation géométrico-ondulatoire de la propagation d'une onde dans un milieu de dimension trois, en présence ou non d'obstacles. Dans le cadre de cette modélisation, une onde est décrite au niveau macroscopique à l'aide de rayons de propagation de l'énergie et de surfaces d'onde et est reconstruite à partir d'un niveau « microscopique » fictif à l'aide du principe de Huygens-Fresnel. Nous nous sommes intéressés aux représentations graphiques et aux explications, données par des étudiants ayant suivi un

enseignement universitaire sur les ondes, à propos de deux situations géométriques (propagation en milieu illimité et face à un plan réfléchissant) et d'une situation ondulatoire (propagation à travers une « petite » ouverture « diffractante »), que ce soit dans le cas de la lumière ou du son. Nous avons constaté que le raisonnement « commun » sur la propagation des ondes en dimension trois a les caractéristiques suivantes :

– il tend à **simplifier** les phénomènes et les modèles. Les étudiants ne différencient pas clairement les concepts mis en jeu mais les amalgament ou les lient (il en est ainsi des concepts de surface d'onde et de surface isoamplitude, de rayon et de surface d'onde) ou bien encore les utilisent de manière dissociée (surface d'onde pour le son et le modèle ondulatoire, rayon pour la lumière et le modèle géométrique) ;

– il relève d'un modèle « **géométrique** » et non ondulatoire. Quelle que soit la situation, les étudiants restent au niveau macroscopique ; ils décrivent ce qui arrive aux rayons de propagation de l'énergie et les considèrent comme indépendants. Dans une situation de diffraction, l'onde du niveau macroscopique n'est pas reconstruite grâce aux sources de Huygens ; tout se passe comme si les rayons de propagation de l'énergie de l'onde incidente étaient réfléchis ou réfractés par les bords de l'ouverture et restaient indépendants après passage de l'ouverture ;

– il est de type **mécaniste**. Les étudiants semblent raconter l'histoire au niveau macroscopique d'objets fictifs qui se déplacent le long de trajectoires-rayons indépendants. De la non différenciation des concepts d'amplitude et de phase, il résulte que les étudiants semblent raisonner sur les « objets » des modèles géométriques (la « lumière », le « son »). Il existe cependant une différence importante entre les « objets » que l'on peut introduire pour rendre compte du raisonnement des étudiants et ceux des modèles géométriques. Tout se passe comme si les « objets » sur lesquels s'appuie le raisonnement des étudiants possédaient « quelque chose » leur permettant d'avancer, d'avoir une intensité, une forme, etc., ce « quelque chose » pouvant varier lors de la propagation. Pour rendre compte des différentes caractéristiques de ces objets une seule notion suffit. Cette notion est un concept hybride regroupant nombre des concepts mis en jeu dans un phénomène ondulatoire (la phase, l'intensité, la surface d'onde, la vitesse de propagation, la fréquence, etc.) et entraînant la variation simultanée de plusieurs grandeurs physiques. Elle a été appelée « capital » pour reprendre un terme introduit par Viennot (1979) et utilisé dans nos recherches antérieures sur la propagation des signaux selon une direction ;

– il tend à **matérialiser** les concepts, c'est-à-dire à les appréhender au travers d'aspects immédiats et perceptifs des phénomènes ou en référence à l'idée d'objet matériel. Les étudiants relient le concept de phase à celui d'intensité de l'onde et raisonnent ainsi sur une grandeur directement

accessible à l'observateur. Ils assimilent le concept de rayon à celui de trajectoire de particules et non à celui de direction de propagation de l'énergie.

Une fois ce raisonnement dégagé, la question s'est posée de le mettre à l'épreuve. D'une part, nous avons validé son caractère mécaniste dans la situation de propagation d'une onde à travers une « petite » ouverture « diffractante » (Maurines, 1997b). D'autre part, nous avons testé son caractère « géométrique » dans d'autres situations nécessitant l'utilisation d'un modèle ondulatoire scalaire : la diffraction de Fraunhofer et la formation des images en éclairage cohérent en présence ou non de diffraction (Maurines, 1999b). Ce sont les résultats de cette dernière recherche que nous présentons ici. Les difficultés soulevées par le modèle ondulatoire scalaire ont été peu explorées sur le plan de la didactique. La plupart des recherches parues sur les conceptions et les raisonnements dans le domaine des ondes concernent des situations dans lesquelles l'optique géométrique peut être utilisée : on trouve en particulier des études portant sur la formation des images par une lentille (Fawaz & Viennot, 1986 ; Goldberg & Mc Dermott, 1987 ; Feher & Rice, 1987 ; Kaminsky, 1989 ; Galili, 1996). Les autres concernent la propagation du son (Linder & Erickson, 1989 ; Linder, 1993) et celles que nous avons menées sur la propagation des signaux selon une direction (Maurines, 1986, 1992, 1998).

Nous traiterons chacun des thèmes de recherche séparément. Nous présenterons tout d'abord les questions explorées et le pourquoi de ces questions, puis la méthodologie utilisée et les résultats obtenus. Nous terminerons la présentation de chaque thème par une brève discussion. Quelques propositions pédagogiques concluront cet article.

2. DIFFRACTION DE FRAUNHOFER

2.1. Objectif

Dans la recherche précédemment citée sur la diffraction d'une onde à travers une « petite » ouverture (Maurines, 1997a), nous avons analysé comment des étudiants ayant suivi un enseignement universitaire sur les ondes expliquent et représentent graphiquement cette situation. Nous avons constaté que leurs réponses sont identiques à celles fournies par des élèves n'ayant reçu aucun enseignement sur les ondes (Maurines, 1997b) : elles concernent le niveau macroscopique et la déviation des rayons de propagation de l'énergie de l'onde incidente. La question s'est posée de savoir si le même type de raisonnement se manifestait dans des situations plus « scolaires » de diffraction de Fraunhofer. Pour cela, nous avons choisi

d'examiner comment les étudiants interprètent le schéma habituellement utilisé au niveau universitaire dans cette situation (voir le schéma 1). Précisons de suite que dans la deuxième partie de cet article nous nous intéresserons de nouveau à cette diffraction car c'est elle qui accompagne la formation des images optiques.

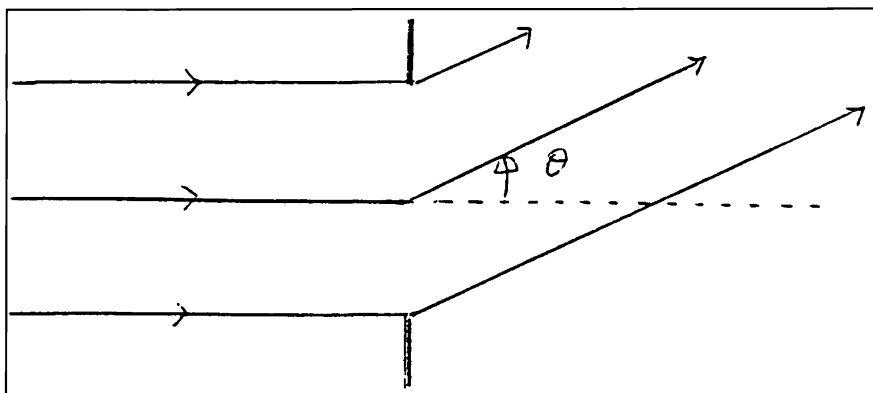


Schéma 1 : Schéma utilisé au niveau universitaire pour l'étude de la diffraction de Fraunhofer

2.2. Quelques remarques sur les différentes interprétations possibles du schéma de la diffraction de Fraunhofer

La diffraction de Fraunhofer est une situation ondulatoire étudiable par un modèle ondulatoire scalaire. Deux formulations en existent : l'onde du niveau macroscopique peut être décomposée sur une base d'ondes sphériques, celles émises par les sources de Huygens (modèle basé sur le principe de Huygens-Fresnel que nous avons appelé modèle « géométrico-ondulatoire ») ou sur une base d'ondes planes (modèle spectral de la diffraction - voir Françon, 1972 ; Goodman, 1972). Cela fait que l'interprétation du schéma n'est pas simple car elle n'est pas univoque. Nous parlerons dans ce qui suit d'interprétation au niveau des ondes élémentaires dès lors que l'on se place dans l'une de ces bases.

Dans le cas d'une **interprétation au niveau des ondes élémentaires basée sur le modèle géométrico-ondulatoire**, on considère que l'amplitude de l'onde en un point donné derrière l'ouverture est la somme des amplitudes des ondes sphériques émises par les sources de Huygens réparties sur l'ouverture. Les lignes parallèles tracées après l'ouverture « diffractante » sont alors considérées comme les rayons de propagation de la phase des ondes émises par les sources de Huygens. Le schéma

donné correspond au schéma habituellement utilisé dans le calcul de l'amplitude de l'onde résultant de la superposition de plusieurs ondes cohérentes, mais dans ce cas le point d'observation est amené à l'infini. L'amplitude de l'onde se propageant derrière l'ouverture dans la direction Θ à l'infini est obtenue grâce à cette interprétation du schéma : le calcul montre que cette amplitude est égale à la transformée de Fourier de la répartition en amplitude de l'onde incidente sur l'ouverture. Les lignes représentées après l'ouverture ne sont donc pas les rayons d'une onde plane et il y a discontinuité de nature entre ce qui est représenté avant et après l'ouverture. En effet, les lignes correspondent à des rayons de propagation de la phase et de l'énergie de l'onde incidente, avant l'ouverture, alors qu'après, ce ne sont que des rayons de propagation de la phase d'ondes émises par les sources de Huygens. Le schéma à ce niveau pose problème puisqu'il y a continuité dans la représentation des lignes tracées.

Dans le cas d'une **interprétation au niveau des ondes élémentaires basée sur le modèle spectral**, on considère que l'amplitude d'une onde dans un plan perpendiculaire à sa direction de propagation est égale à la somme des amplitudes d'ondes planes sinusoïdales se propageant dans toutes les directions. La direction de propagation de ces ondes planes est caractérisée par des fréquences spatiales. La fonction donnant l'amplitude des ondes planes en fonction des fréquences spatiales est appelée « spectre angulaire ». Ce spectre angulaire est égal à la transformée de Fourier de l'amplitude de l'onde étudiée dans le plan initialement considéré. L'angle de la direction de propagation d'une des composantes de la base d'ondes planes avec celle de l'onde étudiée est d'autant plus grand que la fréquence spatiale est grande. La propagation des composantes d'ondes planes depuis ce plan introduit pour chaque composante un déphasage. Ce déphasage dépendant de la valeur de la fréquence spatiale, les répartitions d'amplitudes de l'onde étudiée dans des plans successifs ne sont pas identiques. Le spectre d'ondes planes d'une onde arrivant sur une ouverture est élargi par passage à travers l'ouverture. L'interprétation du schéma peut alors se faire de la manière suivante. Avant l'ouverture sont représentés les rayons de propagation de la phase et de l'énergie de l'onde plane incidente. Après l'ouverture, le spectre de l'onde ne se réduisant plus à une seule composante d'ondes planes, sont représentés les rayons de propagation de la phase d'une des composantes de la base d'ondes planes. L'amplitude de cette composante est donnée par la transformée de Fourier de la répartition en amplitude de l'onde étudiée sur l'ouverture. Dans cette interprétation, aucune source secondaire n'intervient et le schéma peut poser problème. D'une part, une onde plane n'est pas localisée et les lignes tracées après l'ouverture ne proviennent que de la partie du plan où se situe l'ouverture. D'autre part, si les lignes tracées avant l'ouverture peuvent être interprétées, au niveau

macroscopique, comme représentant les rayons de propagation de l'énergie de l'onde incidente et, au niveau des ondes élémentaires, comme l'unique composante spectrale de l'onde incidente, les lignes tracées après l'ouverture ne peuvent être interprétées qu'au niveau des ondes élémentaires et les lignes tracées sur le schéma sont représentées de la même façon avant et après l'ouverture.

Une onde sphérique pouvant être décomposée sur une base d'ondes planes et vice versa, **on peut passer de la décomposition sur une base d'ondes sphériques à la décomposition sur une base d'ondes planes**. Une interprétation graphique de ce passage est possible si on décide de représenter une onde plane par un vecteur et non par un ensemble de lignes parallèles. Les lignes représentées après l'ouverture seront alors considérées comme les composantes d'ondes planes émises par chacune des sources secondaires réparties sur l'ouverture.

Dans le cas de l'**interprétation au niveau macroscopique**, on donne priorité au fait que l'onde diffractée à l'infini est localement plane et donc que les rayons d'énergie sont localement parallèles. Les lignes tracées après l'ouverture sont alors considérées comme les rayons de propagation de la phase ou de l'énergie de l'onde localement plane dans la direction Θ . L'amplitude de cette onde est différente de celle de l'onde incidente : elle est égale à la transformée de Fourier de la répartition en amplitude de l'onde incidente sur l'ouverture diffractante. Dans cette interprétation, le schéma pose problème car étant à l'infini, ce qui vient d'être dit n'est pas valable près de l'ouverture et les lignes partent de l'ouverture et sont tracées en continuité des rayons de l'onde incidente.

On peut passer de l'**interprétation du niveau macroscopique aux interprétations du niveau des ondes élémentaires** de la manière suivante :

- l'onde localement plane se propageant dans la direction Θ est assimilée à la composante de la base d'ondes planes se propageant dans la même direction ;
- l'onde localement plane peut être considérée comme étant la superposition des ondes sphériques émises par les sources secondaires, ces ondes secondaires étant planes car on est à l'infini et déphasées les unes par rapport aux autres du fait de la propagation.

On peut résumer ce qui précède en disant que l'onde localement plane du niveau macroscopique est confondue à l'infini avec la composante d'onde plane se propageant dans la même direction, cette composante étant égale d'une part à la superposition des composantes d'ondes planes émises par les sources de Huygens et d'autre part à celle des ondes

sphériques émises par les sources de Huygens, ondes assimilées à des ondes planes puisqu'on est à l'infini.

Terminons ce point sur les interprétations possibles du schéma en soulignant que :

– les lignes tracées après l'ouverture, quelle que soit la manière de les interpréter, **donnent une information uniquement sur la direction de propagation** des ondes considérées. Aucun renseignement ne peut être obtenu sur l'amplitude de ces ondes par simple lecture du schéma ;

– **la donnée seule du schéma ne permet pas de savoir dans quel cadre l'interpréter**. Selon le contexte, on utilisera une interprétation plutôt qu'une autre. Ainsi, dans le calcul de l'amplitude de l'onde se propageant derrière l'ouverture dans la direction Θ , on considérera que les lignes tracées derrière l'ouverture sont les rayons de propagation de la phase des ondes émises par les sources de Huygens réparties sur l'ouverture ; dans le cas de la formation de l'image d'un point à l'infini accompagnée de diffraction, on considérera plutôt que ce sont les composantes d'ondes planes émises par chaque source de Huygens ou les rayons de propagation de la phase de la composante d'onde plane résultant de leur superposition ; dans le cas des expériences de filtrage spatial, on retiendra plutôt l'interprétation en termes de composante d'onde plane ;

– la représentation graphique de lois et d'outils mathématiques (principe de Huygens-Fresnel et décomposition sur une base d'ondes sphériques, décomposition sur une base d'ondes planes) n'est pas simple et soulève les problèmes que nous venons d'esquisser.

2.3. Méthodologie

Pour connaître la façon dont les étudiants interprètent le schéma de la diffraction de Fraunhofer, nous avons mis au point le questionnaire de l'annexe 1. Il comporte une question sur la signification des lignes tracées après l'ouverture (question 2) et deux autres questions devant permettre d'analyser plus finement les réponses pouvant correspondre à une interprétation macroscopique du schéma. L'une demande quelle est l'amplitude de l'onde plane se propageant derrière l'ouverture (question 2b) et l'autre quelle est la phase des sources de Huygens réparties sur l'ouverture (question 1). Il nous semblait en effet que la tendance à considérer la diffraction comme une simple déviation de l'onde incidente pouvait amener les étudiants à penser que l'onde derrière l'ouverture est plane et de même amplitude que l'onde incidente, que les sources de Huygens réparties sur l'ouverture ne sont pas en phase puisque cette ouverture n'est pas sur un

plan d'onde de l'onde émergeant de l'ouverture. Le questionnaire a été passé à 79 étudiants : 27 d'entre eux ont suivi un enseignement de niveau premier cycle universitaire (étudiants en deuxième année d'université) et 52 un enseignement de niveau deuxième cycle (candidats à un concours pour devenir professeur de physique et chimie dans le secondaire). Bien que les enseignements suivis par ces deux populations étaient susceptibles d'être différents (c'est au niveau du deuxième cycle universitaire que la décomposition sur une base d'ondes planes est en général introduite lors de l'étude de la formation des images en éclairage cohérent), les résultats ne font pas apparaître de différence significative et ont pu être regroupés.

2.4. Résultats

2.4.1. Les sources de Huygens réparties sur l'ouverture sont-elles en phase ?

Quarante quatre pour cent **des étudiants répondent que les sources de Huygens réparties sur l'ouverture ne sont pas en phase**, alors qu'elles le sont puisque l'ouverture est contenue dans une surface équiphasse de l'onde incidente.

Les justifications correspondant à cette réponse montrent que les étudiants au lieu de s'intéresser à l'onde incidente s'intéressent aux lignes tracées après l'ouverture (100 % des 31 justifications sont de ce type). Les lignes étant de longueur différente (ce que la plupart des schémas font apparaître, voir la figure 1 de l'encadré 1), ils en déduisent l'existence d'une différence de phase entre les sources :

« Une différence de marche apparaît entre les rayons issus des différentes sources. Ce qui entraîne des différences de phase entre les sources $\phi = 2\pi \delta/\lambda$ »

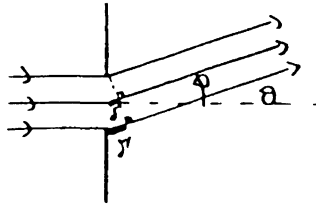
« Car elles ne parcourent pas le même chemin optique. Il existe une différence de marche δ entre 2 rayons successifs. »

Les étudiants s'intéressent aux chemins optiques parcourus par les différentes ondes de Huygens et ne font référence à aucune origine spatiotemporelle. Ils ne raisonnent pas sur la phase d'une onde en un point donné mais sur la différence de phase entre deux points. Cette erreur rappelle celle consistant à assimiler abscisse et distance parcourue et est certainement liée au fait que, pour beaucoup d'étudiants, le terme « phase » renvoie à « différence de phase du mouvement de deux points du milieu » et non pas à « phase d'une onde progressive » (Maurines, 1995).

Quarante sept pour cent **des étudiants répondent que les sources de Huygens réparties sur l'ouverture sont en phase**.

ENCADRÉ 1

Exemples de réponses d'étudiants portant sur l'interprétation du schéma utilisé pour l'étude de la diffraction de Fraunhofer



« Non, elles n'ont pas la même phase car $d\delta = 2\pi d\delta/\lambda$ et il y a une différence de marche $d\delta$ entre 2 faisceaux émergeant de 2 sources voisines. »

Figure 1

la fente fait "introduit" un déphasage - d'onde et alors sphérique

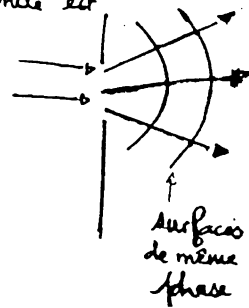


Figure 2

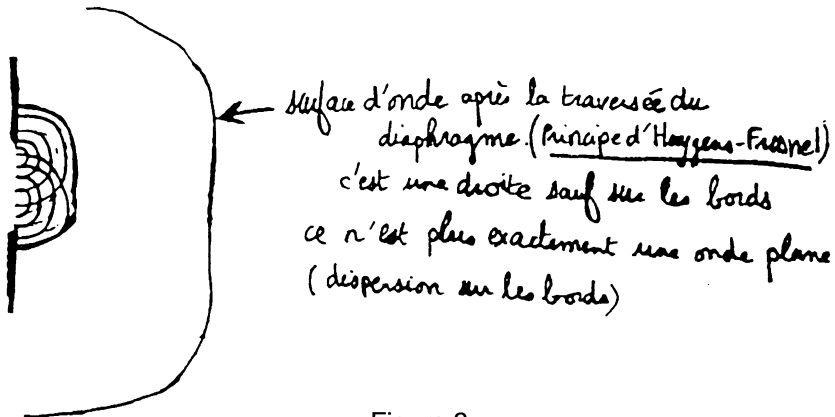


Figure 3

Soixante seize pour cent de ces réponses sont accompagnées d'une justification. Seules 54 % de ces justifications (19 % sur la population totale) sont correctes et font référence au fait que l'ouverture est située dans un plan équiphase de l'onde incidente :

« Car l'onde incidente tombe sous une incidence normale sur le diaphragme. Par conséquent, d'après le théorème de Malus, le diaphragme est un plan équiphase ».

Les autres justifications font référence à la cohérence de la lumière émise par le laser, au fait que les points considérés sont des sources secondaires, que tous les rayons font le même angle avec la direction initiale de propagation.

2.4.2. Que représentent les lignes tracées après l'ouverture ?

Il est à noter tout d'abord le nombre élevé de non réponses à cette question (22 %). Trente huit pour cent des étudiants pensent que les lignes représentées après l'ouverture sont les rayons d'une onde plane et 40 % qu'elles ne le sont pas.

Intéressons-nous aux justifications.

Soixante trois pour cent des réponses (19 étudiants) disant que les lignes tracées après l'ouverture sont les rayons d'une onde plane sont justifiées.

On constate que 17 étudiants sur 19 (22 % sur l'ensemble des 79 étudiants interrogés) font une interprétation du schéma au niveau macroscopique uniquement :

– dix d'entre eux font une lecture directe du schéma :

« Les rayons se propagent dans une direction unique. »

« Les rayons sont orthogonaux à un même plan. Celui-ci représente le front d'onde. Il est perpendiculaire à la direction de propagation des ondes issues des différentes sources. » ;

– six autres font référence à l'onde incidente et la diffraction semble correspondre à une déviation de cette onde :

« Oui, car le changement de direction ne fait pas varier la nature de l'onde. »

« Car elle provient d'une source primaire (le laser) émettant elle-même une onde plane. »

« Car l'onde d'origine est une onde provenant de l'infini donc plane. » ;

– un autre précise qu'on est à l'infini.

Les deux derniers étudiants disant que les lignes sont les rayons d'une onde plane font une interprétation à la fois au niveau macroscopique et au niveau des ondes élémentaires. L'onde est plane et résulte de la superposition des ondes émises par les sources de Huygens :

« Les surfaces d'onde sont les surfaces normales aux rayons. Par conséquent, les rayons représentés correspondent à une onde plane. Cette onde plane est reconstituée par la superposition cohérente des ondes sphériques produites par chaque source secondaire du diaphragme ».

La question sur l'amplitude de l'onde plane, ajoutée lors d'une deuxième passation du questionnaire, n'a été posée qu'à 47 étudiants. Parmi les 14 étudiants (30 %) qui pensent que les lignes représentées après l'ouverture sont les rayons d'une onde plane :

– six ne précisent rien sur l'amplitude ;

– deux pour lesquels l'onde plane résulte de la superposition des ondes émises par les sources de Huygens, donnent sa valeur exacte :

« D'après le principe de Huygens, l'amplitude de l'onde plane se propageant dans la direction Θ est du type $s_0 \text{sinc}(\pi a \Theta / \lambda)$ » ;

– **six qui font une interprétation du schéma uniquement au niveau macroscopique donnent une valeur incorrecte :**

« Amplitude de l'onde incidente/surface de la fente. »

Il est à noter que, pour deux d'entre eux, l'amplitude de l'onde plane se propageant derrière l'ouverture est égale à celle de l'onde incidente :

« L'amplitude de l'onde plane est celle de l'onde incidente avant passage de la fente ».

Quatre vingt un pour cent des réponses (28 étudiants) disant que les lignes représentées après l'ouverture ne sont pas les rayons d'une onde plane sont justifiées.

Soixante huit pour cent des 28 étudiants ne se servent pas du schéma mais font référence à la forme de la surface d'onde, que ce soit de l'onde du niveau macroscopique ou des ondes élémentaires émises par les sources de Huygens ;

– **treize étudiants mentionnent le fait qu'après l'ouverture l'onde au niveau macroscopique n'est pas plane mais sphérique et certains la représentent** (voir la figure 2 de l'encadré 2) :

« Au voisinage de la fente, l'onde est sphérique ».

« Car à la sortie de la fente la lumière se propage dans toutes les directions ».

« C'est une onde sphérique car une onde plane ne peut être obtenue grâce à un trou » ;

– six étudiants mentionnent le fait que les ondes élémentaires émises par les sources de Huygens ne sont pas planes mais sphériques :

« *Chaque point de la fente réémet dans toutes les directions d'après le principe de Huygens-Fresnel (on fait l'approximation d'ondes sphériques en ondes planes) » ;*

– un seul étudiant donne une réponse faisant appel aux deux niveaux d'interprétation et basée sur le principe de Huygens (voir la figure 3 de l'encadré 1).

Vingt cinq pour cent des 28 étudiants donnent une interprétation au niveau des ondes élémentaires uniquement : les lignes tracées représentent les rayons des ondes émises par les sources de Huygens dans une direction donnée. Les points situés sur une surface parallèle à l'ouverture étant en phase, ils arrivent à un paradoxe car les lignes tracées après l'ouverture ne sont pas perpendiculaires à cette surface. Comme les étudiants n'envisagent pas l'onde au niveau macroscopique comme superposition d'ondes planes, ils ne peuvent résoudre le paradoxe en considérant que la différence de marche apparaissant sur le schéma est un déphasage entre des ondes planes. Ils sont ainsi amenés à refuser l'interprétation du niveau macroscopique :

« *Non, car les surfaces équiphasées restent des plans parallèles à ceux de l'onde incidente (la traversée du trou n'introduit pas de déphasage et la propagation se fait à la même célérité pour chaque rayon). Ils représentent la trajectoire des rayons lumineux issus des sources secondaires dans la direction Θ » ;*

« *Non, après la fente, les plans d'onde ne sont pas orthogonaux aux rayons émergents. Ils représentent une direction dans laquelle émet chaque source secondaire. »*

2.5. Discussion

Les résultats obtenus révèlent des difficultés à interpréter correctement le schéma et une tendance à raisonner au niveau macroscopique. En effet :

– à la première question portant sur la phase des sources de Huygens réparties sur l'ouverture, seuls 19 % des étudiants donnent une réponse et une justification correctes. **Les réponses données par 44 % des étudiants sont compatibles avec une lecture macroscopique du schéma** : tout se passe comme si les rayons tracés derrière l'ouverture étaient ceux d'une onde plane et que le plan de l'ouverture n'était pas une surface équiphasée. Les justifications révèlent la même difficulté quant à la notion de phase que celles mises en évidence dans nos précédentes

recherches. La question reste entière de savoir pourquoi les étudiants raisonnent en partant de l'onde se propageant derrière l'ouverture et non de l'onde incidente ;

– à la deuxième question portant sur la nature des lignes tracées derrière l'ouverture, 22 % des étudiants ne répondent pas et 24 % répondent en ne se servant pas du schéma. **La tendance consistant à raisonner en restant au niveau macroscopique, que ce soit en utilisant le schéma ou non, est majoritaire (38 %).** Elle se manifeste préférentiellement à celle consistant à raisonner au niveau des ondes élémentaires, celle-ci n'apparaissant que sur 21 % des réponses. Parmi ces réponses, rares sont celles qui font un lien entre le niveau des ondes élémentaires et le niveau macroscopique (4 % sur la population totale) et qui donnent une amplitude correcte à l'onde plane se propageant dans la direction Θ (2 %). Il est à signaler que la décomposition sur une base d'ondes planes n'est jamais évoquée par les étudiants, y compris par ceux ayant suivi un enseignement de niveau deuxième cycle universitaire.

2.6. Quelques remarques sur l'enseignement

En conclusion à cette étude sur l'interprétation des schémas de diffraction de Fraunhofer, nous voudrions souligner deux points.

Tout d'abord, la tendance « spontanée » à rester au niveau macroscopique peut être renforcée par le fait signalé plus haut que, sur le schéma utilisé traditionnellement dans l'étude de la diffraction à l'infini, il n'apparaît pas de discontinuité au niveau de l'ouverture dans la représentation graphique des rayons.

Ensuite, la tendance des étudiants à ne raisonner que sur le niveau des ondes élémentaires ne peut être remise en question par l'enseignement. En effet, rares sont les manuels du supérieur qui, dans une situation de diffraction, relient le niveau des ondes élémentaires au niveau macroscopique et mettent sur le même plan la décomposition sur une base d'ondes sphériques et celle sur une base d'ondes planes.

Un des manuels consultés se distingue des autres sur ces points (Hecht, 1987). De nombreux schémas basés sur l'utilisation de rayons ou de surfaces d'onde y figurent (voir quelques exemples tirés du chapitre sur la diffraction à l'encadré 2). Certains schémas portent seulement sur le niveau macroscopique (schéma 10.3), d'autres seulement sur le niveau des ondes élémentaires (10.5, 10.6 a et b, 10.10 c et d), d'autres encore sur les deux niveaux (10.10 b). Les schémas du niveau des ondes élémentaires concernent soit la décomposition sur une base d'ondes planes

ENCADRÉ 2

Quelques schémas utilisés dans l'étude de la diffraction de Fraunhofer (Hecht, 1987)

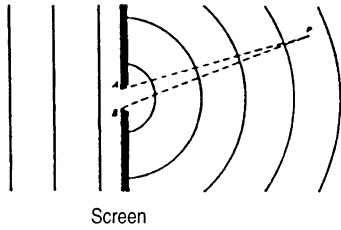


Figure 10.3 Diffraction at a small aperture

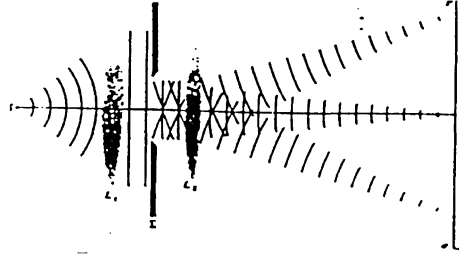


Fig. 10.5 Fraunhofer diffraction

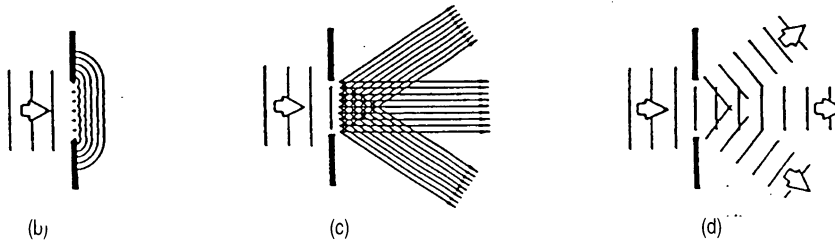


Figure 10.10

(b) Huygens wavelets emitted across the aperture. (c) The equivalent representation in terms of rays. Each point emits rays in all direction. The parallel rays in various directions are seen. (d) These ray bundles correspond to plane waves, which can be thought of as the three-dimensional Fourier components.

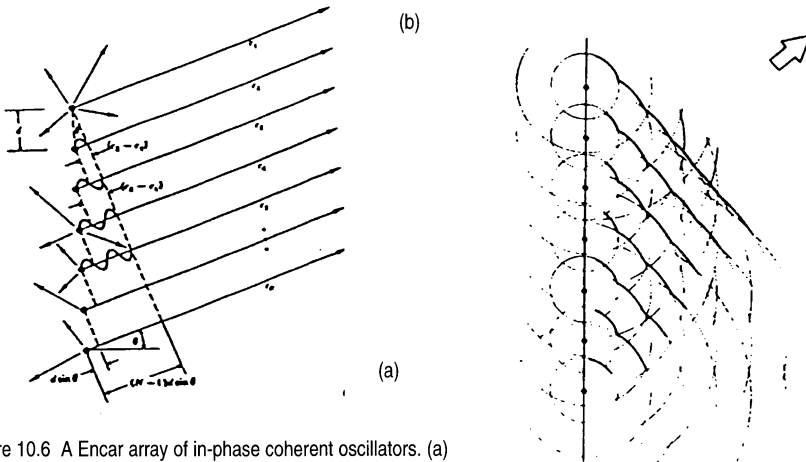


Figure 10.6 A Encar array of in-phase coherent oscillators. (a) Note that at the angle shown $\delta = x$ while $\delta = 0$. d would be zero. (b) One of many acts of wavefronts emitted from a line of coherent point sources.

(10.5, 10.10 d), soit celle sur une base d'ondes sphériques (10.6 a), soit les deux (10.10 c, 10.6 b). Il est à noter, d'une part, que la plupart des schémas concernent le niveau des ondes élémentaires uniquement, et que d'autre part, les rayons interprétés comme rayons de propagation de la phase des ondes secondaires (10.6 a) sont accompagnés d'une sinusoïde. Ce n'est pas le cas de ceux interprétés comme rayons de propagation de la phase d'une composante d'onde plane ou de ceux donnant lieu à cette double interprétation (10.10 c). On peut regretter cependant que les schémas ne soient pas accompagnés de commentaires plus détaillés, notamment ceux reliant deux cadres d'interprétation (10.6 b, 10.10 b et c).

3. FORMATION DES IMAGES EN ÉCLAIRAGE COHÉRENT

Afin de justifier le choix des questions explorées et de situer les réponses des étudiants, nous allons tout d'abord faire quelques remarques sur les modèles permettant d'expliquer la formation des images. Précisons avant toute chose que nous accordons au terme « image » le sens que lui donne Goodman, celui-ci l'introduisant et le définissant de la manière suivante : « *si on place un objet devant une lentille et si on l'éclaire, dans certaines conditions il apparaît alors, dans un second plan, **une distribution d'intensité lumineuse qui ressemble étroitement à l'objet**. Cette distribution en intensité est appelée image de l'objet* » (Goodman, 1972, p. 84).

3.1. Quelques remarques sur les modèles permettant d'expliquer la formation des images

Les propriétés de l'image donnée par une lentille (position, forme, répartition de l'intensité) peuvent être expliquées par deux modèles : le modèle géométrique et le modèle ondulatoire. Le modèle choisi dépendra de la situation étudiée. Le **modèle géométrique** peut être utilisé dans les situations géométriques de formation d'image, c'est-à-dire quand l'objet peut être considéré comme une source de lumière **incohérente** (source lumineuse « étendue » ou objet éclairé par une telle source) et que l'image d'un point est un point (système **stigmatique** rigoureux ou approché : les aberrations géométriques et la diffraction sont négligeables). Le **modèle ondulatoire** doit être utilisé dans les situations ondulatoires de formation d'image, c'est-à-dire quand l'objet peut être considéré comme une source de lumière **cohérente** (source lumineuse monochromatique « ponctuelle » ou laser, objet éclairé par de telles sources) ou quand l'image d'un point

n'est pas un point (la **diffraction** ou les aberrations géométriques ne sont pas négligeables). Dans les situations géométriques, ce modèle conduit aux mêmes résultats que le modèle géométrique, mais avec un travail plus long !

Le modèle **géométrique** explique ce qui se passe en restant au niveau macroscopique. Il s'appuie sur les concepts de **points-objets et points-images incohérents**, de **rayons de propagation de l'énergie**, **d'indépendance des rayons**.

L'image d'un point donnée par une lentille est obtenue en appliquant les lois de Descartes aux rayons de propagation de l'énergie issus de ce point et en prenant l'intersection des rayons émergeant de la lentille (la lentille étant « parfaite », deux rayons suffisent). Les rayons de propagation de l'énergie issus du point-objet ne dépendent pas des conditions aux limites, nous dirons qu'ils sont indépendants. Ceci se traduit expérimentalement par le fait que la suppression d'une partie de la lumière issue de la lentille change l'intensité de l'image mais pas sa forme (celle-ci reste ponctuelle). Les schémas 1 et 2 du tableau 1 illustrent ce qui vient d'être dit dans le cas particulier de l'image d'un point à l'infini.

Pour obtenir l'image d'un objet étendu, on décompose l'objet en une infinité de points-objets et on en cherche les points-images. Les points-objets étant incohérents, les rayons de propagation de l'énergie des ondes émises par ces différents points sont indépendants les uns des autres : « ils se croisent en gardant leur identité propre ». Ceci se traduit expérimentalement par le fait que l'image d'un point-objet ne dépend pas des images des autres points-objets. Les rayons de propagation de l'énergie ne dépendent pas des conditions aux limites, la suppression d'une partie de la lumière issue de la lentille change l'intensité de l'image étendue mais pas sa forme. L'indépendance des rayons d'énergie et la non-cohérence des points-objets font que l'intensité de l'image est obtenue en utilisant la conservation du flux énergétique dans un faisceau et en ajoutant les intensités des ondes émises par les différents points-objets (photométrie).

Le modèle **ondulatoire** explique ce qui se passe au niveau macroscopique **en partant du niveau des ondes élémentaires**. On retrouve les deux formulations précédemment décrites à propos de l'interprétation du schéma utilisé dans l'étude de la diffraction de Fraunhofer : celle décomposant l'onde du niveau macroscopique sur une base d'ondes sphériques (modèle géométrico-ondulatoire) et celle utilisant une base d'ondes planes (modèle spectral de la diffraction).

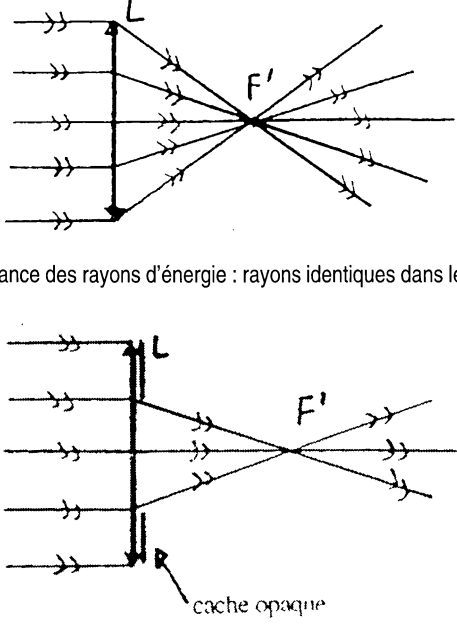
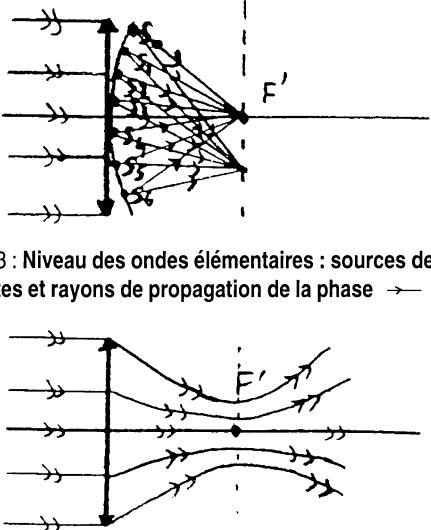
<p>modèle géométrique</p>	 <p>indépendance des rayons d'énergie : rayons identiques dans les deux situations</p> <p>Schémas 1 et 2 : Rayons de propagation de l'énergie →→</p>
<p>modèle ondulatoire</p>	 <p>Schéma 3 : Niveau des ondes élémentaires : sources de Huygens cohérentes et rayons de propagation de la phase →</p> <p>Schéma 4 : Niveau macroscopique : rayons de propagation de l'énergie interdépendants (la présence d'un cache sur la lentille les modifie) ; simplification d'un schéma tiré de Boivin et al (1967) obtenu dans le cadre d'un modèle vectoriel</p>

Tableau 1 : Schémas utilisés lors de l'étude de la formation de l'image d'un point à l'infini donnée par une lentille

Dans le modèle **géométrico-ondulatoire**, la formation de l'image d'un point donnée par une lentille est expliquée en décomposant la surface d'onde de l'onde émergeant de la lentille en une infinité de **sources de Huygens cohérentes** et en considérant que l'onde en un point donné derrière la lentille résulte de la superposition des ondes émises par ces sources (Françon, 1972 ; Goodman, 1972). On peut montrer que c'est dans le plan-image conjugué du plan dans lequel se trouve le point que l'on trouve une distribution d'intensité ressemblant le mieux à celle du point-objet considéré. Dans ce plan, l'amplitude de l'onde émergeant de la lentille correspond à celle donnée par la diffraction de Fraunhofer de l'onde incidente par la lentille. Lorsque la diffraction est négligeable, l'amplitude de l'onde émergente prend une valeur importante uniquement en une tache assimilable à un point. Ce point coïncide avec le point-image du point-objet prévu par le modèle géométrique. Lorsque la diffraction n'est pas négligeable, l'amplitude de l'onde émergente n'est pas nulle dans un petit domaine entourant l'image géométrique du point-objet. La **tache** correspondant à ce domaine est l'image du **point-objet**. Elle est toujours dans le plan-image mais n'est plus ponctuelle. Sa forme dépend de la forme de l'ouverture limitant l'onde émergente. Les rayons de propagation de l'énergie de l'onde au niveau macroscopique dépendant des conditions aux limites, nous dirons qu'ils sont **interdépendants**. Les schémas 3 et 4 du tableau 1 illustrent ce qui vient d'être dit dans le cas particulier de l'image d'un point à l'infini.

Dans le cadre de ce modèle, l'image d'un objet étendu donnée par une lentille est obtenue en décomposant l'objet en une infinité de points-objets et en appliquant ce qui précède à chaque point-objet. Ceci concerne non seulement les sources de lumière mais aussi les **objets éclairés**, en particulier, les objets transparents ayant une action sur l'amplitude de l'onde utilisée pour les éclairer (par exemple, un diaphragme) ou ceux ayant une action sur la phase de l'onde (par exemple, un échantillon très fin que l'on observe au microscope), que l'on néglige ou non la diffraction de la lumière par l'objet éclairé. Pour obtenir l'intensité lumineuse dans le plan image, il est nécessaire de tenir compte de la nature de la lumière émise par l'objet : le système est en effet linéaire en amplitude dans le cas d'une lumière cohérente, linéaire en intensité dans le cas d'une lumière incohérente. Cela revient à dire que **l'image de l'objet éclairé résulte de la superposition de taches-images de diffraction cohérentes si l'éclairage est cohérent, incohérentes sinon**. L'image d'un objet éclairé en lumière cohérente et celle obtenue en lumière incohérente peuvent être considérées en première approximation comme identiques – en fait, il existe une influence de l'éclairage sur la qualité de l'image et celle-ci est très complexe (voir Goodman, 1972) –. La méthode qui vient d'être présentée de la formation de l'image d'un objet étendu a été proposée pour la première fois par Lord

Rayleigh en 1896 (Hecht, 1987, p. 563). Basée sur la décomposition de l'objet en points-objets, elle est proche de la méthode utilisée dans le modèle géométrique mais s'en distingue par le fait que l'image d'un point-objet est une tache de diffraction et que les taches-images doivent être considérées comme cohérentes dans le cas d'un éclairage cohérent. Dans le cas d'un éclairage incohérent et d'une lentille supposée « parfaite », cette méthode redonne les résultats du modèle géométrique.

Dans le cas d'un système comprenant non seulement une source de lumière et une lentille mais aussi un autre objet éclairé, il existe derrière la lentille deux images : celle de la source de lumière et celle de l'objet éclairé. Dans le cas où la lentille est supposée « parfaite », on considère que l'image de la source de lumière résulte de la superposition des ondes émises par tous les points-objets répartis sur la surface de l'objet éclairé. On est ramené aux méthodes précédemment décrites de la formation d'une image ponctuelle ou étendue par une lentille. La forme de l'image de la source dépend donc de la nature de l'objet éclairé (« diffractant » ou non : nous signifions par ce raccourci que la diffraction de la lumière par l'objet n'est pas négligeable dans le premier cas alors qu'elle l'est dans le second).

Le **modèle spectral de la diffraction** fait appel aux méthodes de l'analyse de Fourier. On retrouve le fait que l'amplitude de l'onde émergente du plan où se trouve l'objet peut être considérée comme étant égale à la somme des amplitudes d'ondes planes sinusoïdales se propageant dans toutes les directions. Chaque point lumineux dans le plan focal image de la lentille correspond au point de focalisation d'une composante d'onde plane et indique la présence d'une fréquence spatiale particulière dans le spectre de l'amplitude de l'onde dans le plan objet (Hecht, 1987 ; Goodman, 1972). Selon l'interprétation proposée pour la première fois par Abbe en 1873, l'image d'un objet éclairé en lumière cohérente résulte de la superposition cohérente des ondes émises par tous les points lumineux du plan focal image de la lentille (Hecht, 1987, p. 563).

Dans le modèle ondulatoire, les rayons de propagation de l'énergie de l'onde au niveau macroscopique vérifient les lois de Descartes uniquement si la diffraction est négligeable. Ils ne dépendent pas des conditions aux limites dans ce cas, autrement ils en dépendent : dans une situation de diffraction en éclairage cohérent, on ne peut supprimer une partie de la lumière issue de la lentille en plaçant un cache dans son plan focal image sans modifier, non seulement l'intensité de l'image de l'objet éclairé, mais aussi sa forme (expérience de filtrage spatial). Nous dirons là encore que les rayons sont interdépendants.

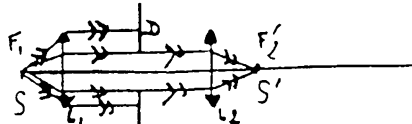
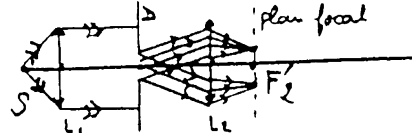
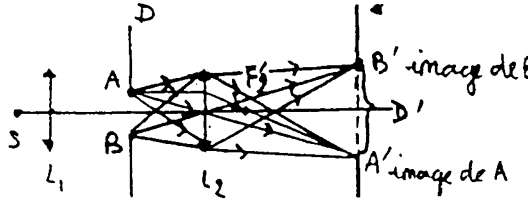
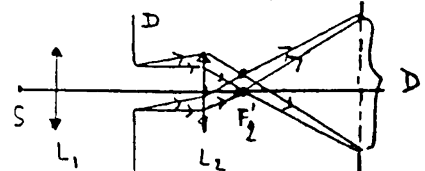
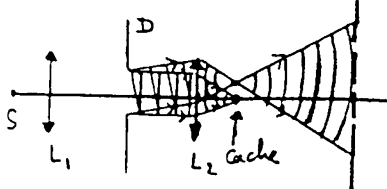
Situation physique	Réponses correctes
<p>Formation de l'image d'un point source en absence de diffraction.</p>	<p>Image ponctuelle au foyer image de la lentille d'observation moins lumineuse que dans la situation de référence mais de même forme.</p>  <p>Schéma 1 : Modèle géométrique : rayons de propagation de l'énergie indépendants</p>
<p>Formation de l'image d'un point source en présence de diffraction.</p>	<p>Image déformée par la diffraction existant au niveau du diaphragme, située dans le plan focal image de la lentille.</p>  <p>Schéma 2 : Rayons de propagation de la phase : schéma pouvant correspondre au modèle géométrico-ondulatoire ou au modèle spectral</p>
<p>Formation de l'image d'un diaphragme éclairé par un faisceau parallèle.</p>	<p>Image de forme identique à celle de l'objet, située dans le plan image conjugué prévu par l'optique géométrique.</p>  <p>Schéma 3 : Modèle géométrico-ondulatoire, interprétation de Rayleigh : rayons de propagation de la phase d'ondes sphériques cohérentes, points-objets et points-images cohérents</p>  <p>Schéma 4 : Modèle spectral, interprétation d'Abbe : rayons de propagation de la phase d'ondes planes cohérentes</p>
<p>Formation de l'image d'un diaphragme «diffractant» quand une partie de la lumière émergente de la lentille est supprimée.</p>	<p>Forme de l'image modifiée : les rayons de propagation de l'énergie de l'onde cohérente du niveau macroscopique sont interdépendants, les ondes élémentaires sont cohérentes.</p>  <p>Schéma 5 : Modèle spectral : suppression d'une des composantes d'ondes planes</p>

Tableau 2 : **Éléments de réponses correctes à des situations de formation d'images**

Les schémas utilisés pour expliquer la formation des images font intervenir des ondes incohérentes pour ceux relevant du modèle géométrique et des ondes cohérentes pour ceux relevant du modèle ondulatoire. Les rayons apparaissant sur le premier type de schémas sont des rayons de propagation de l'énergie. Ceux apparaissant sur le deuxième type de schémas et concernant le niveau des ondes élémentaires sont des rayons de propagation de la phase. Qu'il y ait diffraction ou non, les rayons de propagation de la phase du modèle ondulatoire obéissent aux lois de Descartes. Comme nous l'avons déjà signalé dans l'étude concernant le schéma de la diffraction de Fraunhofer, les schémas ne donnent aucune information sur l'amplitude des ondes.

Les schémas du modèle ondulatoire portant sur le niveau des ondes élémentaires font apparaître soit des ondes sphériques émises par des points-sources cohérents (sources de Huygens réparties sur la surface d'onde de l'onde émergeant du système optique ou points-objets répartis sur la surface d'un objet éclairé en lumière cohérente), soit des ondes planes émergeant du plan dans lequel se trouve l'objet éclairé (voir le tableau 2). Le premier type de schéma relève du modèle géométrico-ondulatoire et met bien en évidence la localisation de l'image d'un objet éclairé (schéma 3 du tableau 2). Par contre, il rend difficilement compte des expériences de filtrage spatial. Le second type de schéma, quant à lui, relève du modèle spectral. Il met bien en évidence la formation de l'image d'un objet éclairé par superposition des composantes d'ondes planes (schéma 4 du tableau 2) et permet de comprendre la modification de la forme de cette image lors d'un filtrage spatial (schéma 5 du tableau 2), mais par contre, pose problème quant à la localisation de l'image. Celle-ci semble être là où se trouve l'écran.

Terminons ces remarques en disant que la donnée seule d'un schéma ne permet pas toujours de savoir dans quel cadre l'interpréter. Il en est ainsi des schémas du modèle ondulatoire portant sur le niveau des ondes élémentaires. Ceux qui ne font apparaître que des rayons (schéma 2 du tableau 2) soulèvent les problèmes évoqués dans l'étude précédente. Ceux relevant du modèle géométrico-ondulatoire et concernant la formation de l'image d'un objet éclairé étendu dans le cas où la lentille est supposée « parfaite » peuvent, eux-aussi, prêter à confusion (schéma 3 du tableau 2) : seule la prise en compte de l'onde incidente permet de faire apparaître la cohérence des points-objets et ainsi de différencier ces schémas de ceux du modèle géométrique.

3.2. Questions explorées

Pour tester la nature « géométrique » du raisonnement mis en oeuvre par les étudiants, nous avons choisi des situations de formation d'image nécessitant l'utilisation d'un modèle ondulatoire. Celles-ci concernent la formation de l'image d'un point en présence de diffraction et la formation de l'image d'un objet transparent d'amplitude (diaphragme) éclairé en lumière cohérente. En effet, tout laissait supposer l'existence de difficultés quant à la position des images et à l'interdépendance des rayons lumineux dans la situation de diffraction, quant à l'existence de l'image d'un diaphragme éclairé en lumière parallèle. De plus la question se posait également d'examiner si dans ce type de situations, le raisonnement en termes d'image voyageuse mis en évidence dans des situations d'optique géométrique pouvait se manifester.

L'étude présentée ici répond aux questions suivantes.

Pour les étudiants, un point source situé à l'infini a-t-il une image quand la diffraction ne peut être négligée ? Si oui, cette image se trouve-t-elle dans le plan focal image de la lentille ou ailleurs ?

Pour les étudiants, un diaphragme éclairé par un faisceau de lumière parallèle a-t-il une image ? Si oui, où est-elle ? Leur réponse dépend-elle de la nature du diaphragme (« diffractant » ou non) ? Comment est pour eux l'image d'un diaphragme « diffractant » ?

Pour les étudiants, les rayons de propagation de l'énergie dans une situation de diffraction sont-ils interdépendants ou non (autrement dit, comment sont les images lorsqu'on supprime une partie de la lumière issue de la lentille) ?

situation physique <i>énoncé des questions</i>	questions explorées <i>modèle à utiliser</i>	hypothèses testées et tendances de raisonnement mises en évidence
formation de l'image d'un point-source en absence de diffraction <i>annexe 2 question 1a</i>	existence, position de l'image du point-source <i>optique géométrique</i>	question posée pour comparaison
formation de l'image d'un point-source en présence de diffraction <i>annexe 2 question 1b</i>	existence, position de l'image du point-source <i>optique physique</i>	suivre les rayons d'énergie issus de la source et qui divergent après le diaphragme
formation de l'image d'un diaphragme « non diffractant » éclairé par un faisceau parallèle <i>annexe 2 question 2a</i>	existence, position de l'image du diaphragme « non diffractant » <i>optique physique</i>	suivre les rayons d'énergie issus de la source
formation de l'image d'un diaphragme « diffractant » éclairé par un faisceau parallèle <i>annexe 2, question 2b annexe 3, question 1</i>	existence, position, forme de l'image du diaphragme « non diffractant » <i>optique physique</i>	suivre les rayons d'énergie issus de la source raisonner en terme d'image voyageuse
formation de l'image d'un diaphragme « diffractant » quand une partie de la lumière émergeant de la lentille est supprimée <i>annexe 2, question 3b annexe 3, question 2</i>	existence, forme de l'image du diaphragme « diffractant » <i>optique physique</i>	suivre les rayons d'énergie issus de la source considérer les rayons d'énergie comme indépendants raisonner en terme d'image voyageuse

Tableau 3 : Questions explorées concernant la formation des images

3.3. Méthodologie

Nous avons débuté cette étude à l'aide d'un questionnaire papier-crayon (voir l'énoncé en annexe 2). La situation « classique » à deux lentilles utilisée dans l'étude de la diffraction de Fraunhofer est présentée une fois avec un diaphragme « diffractant », une fois avec un diaphragme « non diffractant ». La première question du questionnaire porte sur l'image du point-source en présence ou non de diffraction, la deuxième sur l'image des diaphragmes. La troisième question porte sur ce qui se passe quand on supprime une partie de la lumière issue de la lentille. La question sur l'image du diaphragme « diffractant » n'étant pas assez précise (elle ne demande pas quelle est sa forme), nous avons été conduit à élaborer un deuxième questionnaire (voir l'énoncé en annexe 3). Dans celui-ci, on précise que l'image du diaphragme « diffractant » est observée et on demande quelle est sa forme en présence ou en absence de cache. Le tableau 3 récapitule les situations et les questions explorées, les hypothèses que l'on voulait tester. Les éléments de réponses correctes donnés au tableau 2 concernent les situations proposées aux étudiants.

Environ une centaine d'étudiants ayant reçu un enseignement universitaire sur la formation des images ont été interrogés : une trentaine ont suivi un enseignement de niveau premier cycle (étudiants en classe de mathématique spéciale), les autres de niveau second cycle (candidats à un concours pour devenir professeur de physique et chimie dans le secondaire). Aucune différence notable n'apparaissant entre les résultats fournis par ces deux populations, nous les avons regroupés.

3.4. Résultats

3.4.1. Existence et position de l'image du point-source en l'absence de diffraction

Pour 96 % des étudiants (N=73), l'image du point-source T existe toujours quand on introduit le diaphragme « non diffractant » celui-ci ayant pour simple rôle de limiter le faisceau lumineux arrivant sur la deuxième lentille et ainsi de diminuer la luminosité de l'image :

« D_1 ne sert à rien : on peut tout aussi bien l'enlever (il fait juste baisser l'intensité) ».

Il est à noter que trois étudiants pensent que l'image du point-source n'existe plus car c'est le diaphragme qui est devenu l'objet :

« Non, car le trou D_1 est désormais le nouveau trou source ».

« Non, on observe l'image du trou de la fente D_1 ».

Ce type de réponse très minoritaire dans le cas présent va réapparaître dans la suite.

3.4.2. Existence et position de l'image du point-source en présence de diffraction

Même si une majorité d'étudiants (55 %, N=73) répond correctement en confirmant l'existence d'une image pour le point-source, beaucoup d'étudiants (42 %) pensent qu'elle n'existe plus.

Intéressons-nous tout d'abord aux étudiants qui pensent que l'image du point-source T existe :

– deux tiers des étudiants qui précisent la position de cette image répondent correctement : l'image est dans le plan focal image de la deuxième lentille. Les commentaires et les dessins accompagnant cette réponse montrent que les étudiants se placent au niveau des ondes élémentaires (figure 1 de l'encadré 3).

– un tiers des étudiants qui précisent la position de cette image la situe derrière le plan focal image de la deuxième lentille (14 % de la population totale). Les justifications et schémas accompagnant cette réponse (figure 2 de l'encadré 3) indiquent que **les étudiants utilisent les rayons d'énergie du niveau macroscopique pour déterminer la place de l'image**. Ces rayons étant divergents et non parallèles, l'image du point-source est derrière le plan focal image :

« Les rayons n'arrivent plus parallèles sur L_2 ».

« On peut observer l'image du trou source. L'endroit de localisation de l'image sera différent car les rayons après diffraction n'auront pas la même direction de propagation que dans la situation de référence ».

Intéressons-nous à présent aux étudiants qui pensent que l'image du point-source n'existe pas. Leurs justifications sont de trois types :

– ce n'est pas l'image du point-source qui est observée mais une figure de diffraction (figure 3 de l'encadré 3) (14 étudiants, c'est-à-dire 19 % de la population totale) :

« Il y a diffraction, on observe donc une figure de diffraction et non plus une image du trou » ;

– ce n'est pas l'image du point-source qui est observée mais celle du diaphragme D_2 (6 étudiants, c'est-à-dire 8 % de la population totale). On retrouve ici un type de justifications données pour le diaphragme D_1 :

« La fente D_2 se comporte comme une nouvelle source (« perte de la mémoire » de l'existence de T) » (figure 4 de l'encadré 3).

« La source de lumière pour L_2 est une source secondaire, à savoir D_2 . On occulte alors complètement le fait qu'il y ait une source primaire (T) et D_2 est alors la nouvelle source de lumière pour L_2 » ;

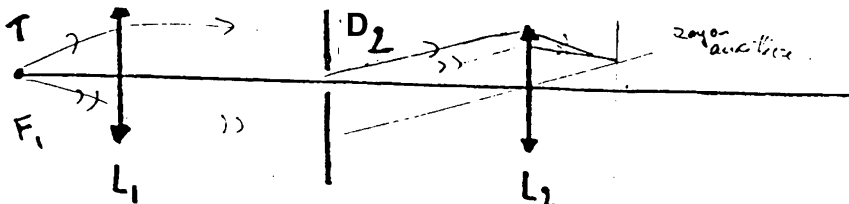
– il n'y pas d'image car il y a diffraction (6 étudiants, c'est-à-dire 8 % de la population totale) :

« Non, car les rayons sont diffractés »

Nous avons séparé ces réponses de celles qui précèdent car il n'est pas fait mention de l'observation de quelque chose. La lecture des commentaires nous amène à faire deux hypothèses dans le but d'expliquer ce type de réponses. Tout d'abord, une image ne pourrait exister en présence de diffraction car le trajet des rayons ne peut être prévu par les lois de l'optique géométrique : « Les rayons sont diffractés : ils partent dans des directions aléatoires, on ne peut donc appliquer les lois de l'optique géométrique ». Ensuite, une image ne pourrait exister en présence de diffraction car l'intersection des rayons émergents n'est pas un point : « L'image du trou source T ne peut être observée derrière la lentille L_2 car les rayons ne convergent pas vers le même point » (figure 5 de l'encadré 3).

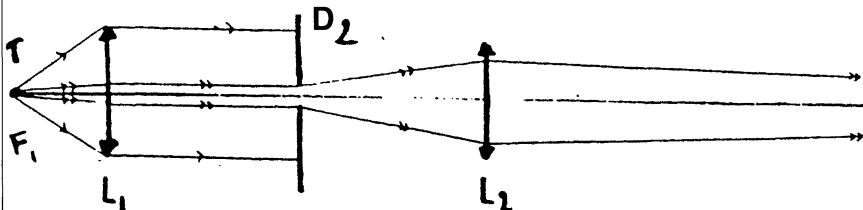
ENCADRÉ 3

Exemples de réponses d'étudiants à propos de l'image du point source lorsqu'il y a de la diffraction



« Oui, il y a diffraction, mais on aura pas uniquement un point image car il sera accompagné de tache de diffraction. »

Figure 1



« Oui, on peut observer l'image de T , mais pas au même endroit (il faut éloigner l'écran) T' aurait alors la même forme mais pas le même éclairement. »

Figure 2

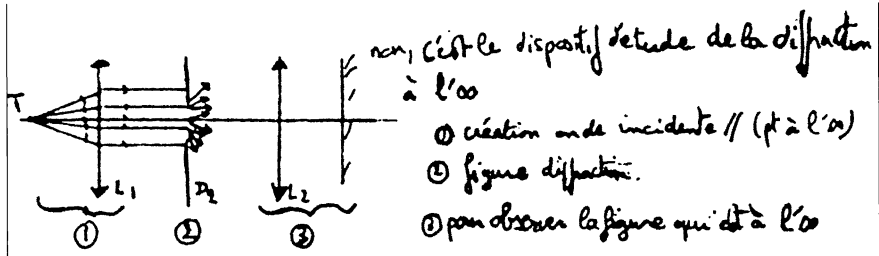
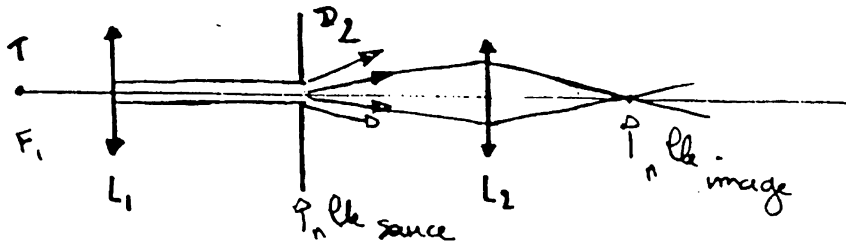
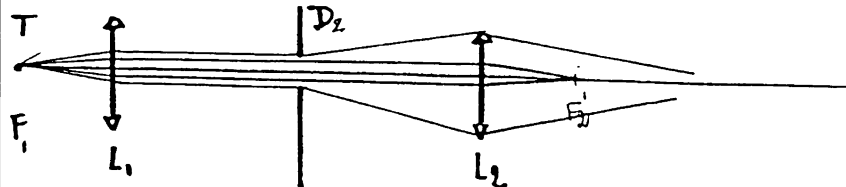


Figure 3



« Non, la fente D_2 se comporte comme une nouvelle source de lumière ("perte de la mémoire" de l'existence de T). »

Figure 4



« Non, on ne peut observer l'image de T car à la sortie de L_2 , les rayons ne vont pas tous converger vers le même point. »

Figure 5

3.4.3. Existence et position de l'image d'un diaphragme « non diffractant »

Quarante cinq pour cent des étudiants (N=73) pensent que l'image d'un diaphragme « non diffractant » existe (ce qui est correct) alors que pour 49 % elle n'existe pas.

Parmi les étudiants qui répondent que cette image existe, 73 % (33 % sur la population totale) précisent où elle se situe :

– une minorité d'étudiants (11 % sur la population totale) la place correctement. Les schémas donnés (figure 1 de l'encadré 4) indiquent que les étudiants ne suivent pas les rayons de propagation de l'énergie issus de la source mais se placent au niveau des ondes élémentaires en cherchant l'image des sources de Huygens réparties sur le diaphragme ;

– les schémas (figure 2 de l'encadré 4) et les justifications donnés par une majorité d'étudiants (22 % sur la population totale), révèlent que pour eux, l'image est dans le plan focal image de la deuxième lentille. **Ces étudiants suivent les rayons de propagation de l'énergie issus de la source et restent à un niveau macroscopique. Ils sont ainsi conduits à confondre l'image du diaphragme et l'image du point-source T :**

« Les rayons sont parallèles et vont converger au foyer image de L_2 (F'_2) ».

« On a une image de D_1 si celui-ci est placé à une distance supérieure à la distance focale de L_2 . L'image sera alors en F'_2 ».

La majorité des justifications fournies par les étudiants qui pensent que l'image du diaphragme « non diffractant » (36 % sur la population totale) n'existe pas montrent que les étudiants suivent les rayons d'énergie du **niveau macroscopique**.

La plupart note le fait que les rayons sont parallèles :

« On ne peut observer l'image de D_1 , car d'après le dispositif, il n'émerge de D_1 qu'un faisceau de lumière parallèle (qui converge après la lentille en T') donc on ne peut pas récupérer l'image de D_1 ».

Certains explicitent le fait que le diaphragme ne peut être considéré comme une source car les rayons à la sortie du diaphragme sont parallèles :

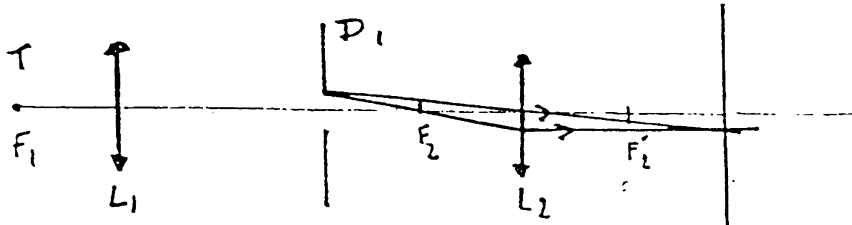
« D_1 n'est pas considérable en tant que source lumineuse : D_1 n'émet pas dans toutes les directions ».

D'autres disent que ce que l'on observe c'est l'image du point-source :

« On observe l'image de T ».

ENCADRÉ 4

Exemples de réponses d'étudiants à propos de l'image d'un diaphragme éclairé par un faisceau de lumière parallèle



« Oui, il faut placer l'écran d'observation dans le plan image conjugué par L_2 du plan objet contenant D_1 . »

Figure 1

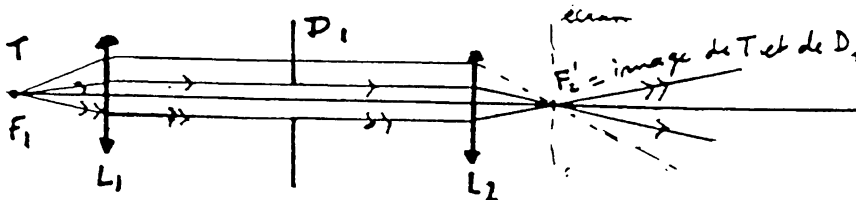
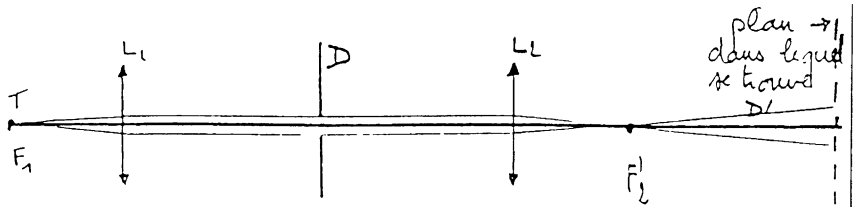
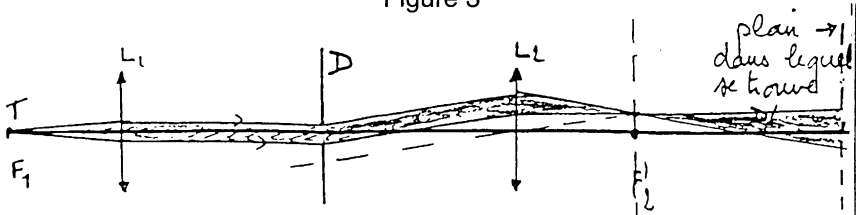


Figure 2



« Oui, on obtient une tache circulaire : image du trou. En dehors, la lumière est légèrement diffusée par diffraction mais comme on n'est pas dans le plan focal, l'image de diffraction est floue. »

Figure 3



« Le plan est situé à une distance de L_2 supérieure à la distance focale de cette dernière. Par conséquent, la tache est circulaire. »

Figure 4

3.4.4. Existence, position et forme de l'image d'un diaphragme « diffractant ».

Le pourcentage de réponses indiquant que l'image du diaphragme « diffractant » existe est légèrement plus élevé que dans le cas du diaphragme « non diffractant » (53 % au lieu de 45 %, N=73). Il est à noter que sur 28 % de ces réponses, il est fait mention que le diaphragme se comporte comme un objet ou une source à cause de la diffraction :

« D_2 agit comme un objet dans le cas de la diffraction ».

« Le trou D_2 peut être considéré comme une source. En effet la lumière est émise dans toutes les directions (principe de Huygens) ».

Intéressons-nous à présent à la position de l'image de ce diaphragme.

Un tiers des réponses (18 % sur la population totale) sont correctes quant à son positionnement.

Un tiers des réponses sont incorrectes. Comme dans le cas du diaphragme « non diffractant », l'image est dans le plan focal image de la deuxième lentille :

« Au plan focal image de L_2 ».

« D_2 se comporte comme une source secondaire (parce qu'elle diffracte la lumière). Les lentilles sont convergentes et D_2 est un objet réel pour L_2 . Son image sera réelle à droite de L_2 sur le schéma. Elle est confondue avec l'image de T ».

Certains étudiants disent que l'image du diaphragme est la figure de diffraction ou son centre :

« Image de D_2 : image géométrique à travers L_2 , c'est à dire dans le plan image F'_2 . Cette image de D_2 sera sur le centre de la figure de diffraction ».

« On peut observer l'image de D_2 à travers sa figure de diffraction, c'est-à-dire que la frange centrale est l'image de D_2 ».

Il y a 32 % d'étudiants qui pensent que l'image du diaphragme « diffractant » n'existe pas. La majorité des justifications (87 % d'entre elles, c'est-à-dire 18 % sur la population totale) mentionnent l'existence de la diffraction :

« Non, il y a diffraction ».

« Non, les rayons issus de D_2 partent dans tous les sens ».

« Non, à cause de la diffraction : ce qu'on observe est une figure de diffraction ».

« Non, c'est un phénomène de diffraction qui n'est plus régi par les lois de l'optique géométrique ».

On retrouve un fait mentionné plus haut : il semble qu'il ne peut y avoir d'image en présence de diffraction, comme si les deux phénomènes s'excluaient mutuellement.

Quand on demande aux étudiants quelle est la forme de l'image d'un diaphragme « diffractant », on en rencontre beaucoup qui disent qu'elle ressemble à une figure de diffraction (réponse fournie par 47 % des 17 étudiants interrogés) ou à une tache de diffraction (24 %) :

« C'est une tache brillante entourée d'anneaux sombres et clairs : c'est l'image de diffraction du diaphragme ».

« Nous avons une tache circulaire : l'image du trou. En dehors, la lumière est légèrement diffusée par diffraction mais comme on n'est pas dans le plan focal de la lentille, la figure de diffraction est floue ».

Ce qui est observé sur l'écran semble être la projection de la figure de diffraction observée dans le plan focal image de la lentille.

Ceci apparaît non seulement dans les commentaires :

« D', image de D, est en fait la projection de cercles concentriques causés par la diffraction en D à travers la lentille L_2 »

mais aussi sur les quelques constructions graphiques accompagnant les réponses (figures 3 et 4 de l'encadré 4). Il y a toujours un seul rayon partant d'un point du diaphragme et allant vers l'écran.

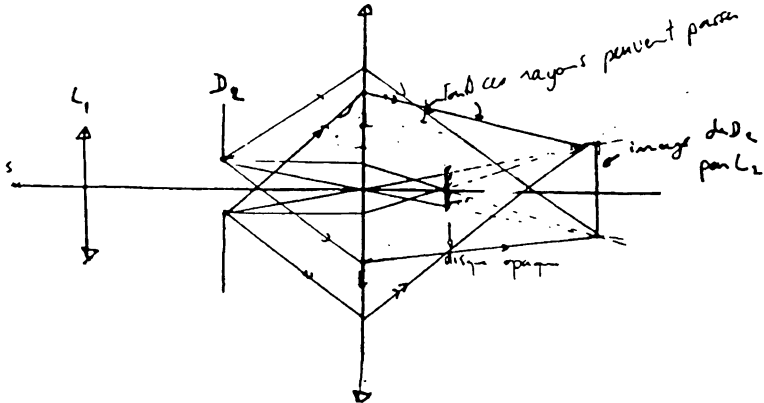
Terminons cette présentation des résultats sur l'existence et la position des images des diaphragmes en disant qu'une corrélation des réponses montre que seulement 18 % des étudiants envisagent l'existence d'une image pour chaque diaphragme, 3 d'entre eux précisant leur position correctement (4 % sur la population interrogée).

3.4.5. Les rayons d'énergie sont-ils interdépendants dans une situation de diffraction ?

À la question demandant ce qui se passe quand on supprime une partie de la lumière émergeant de la lentille en plaçant au foyer image un petit cache, beaucoup d'étudiants qui répondent que l'image des diaphragmes existait en l'absence de cache (ou qui ont répondu au questionnaire disant que l'image du diaphragme « diffractant » est observée) ne répondent pas : 25 % dans le cas du diaphragme « non diffractant » (N=44), 33 % dans le cas du diaphragme « diffractant » (N=61). Les autres étudiants répondent correctement : l'image du diaphragme « non diffractant » n'est plus observée alors que l'image du diaphragme « diffractant » l'est (61 % dans les deux cas). Les justifications tiennent compte du fait que, dans le cas du diaphragme « non diffractant », toute la lumière émergeant de la lentille converge au foyer de la lentille et est donc arrêtée, et que, dans le cas du diaphragme « diffractant », une partie de la lumière passe en dehors de ce point et n'est donc pas arrêtée.

ENCADRÉ 5

Exemples de réponses d'étudiants à propos de la forme de l'image d'un diaphragme « diffractant » quand une partie de la lumière émergente de la lentille est supprimée



« L'image est la même »

Figure 1

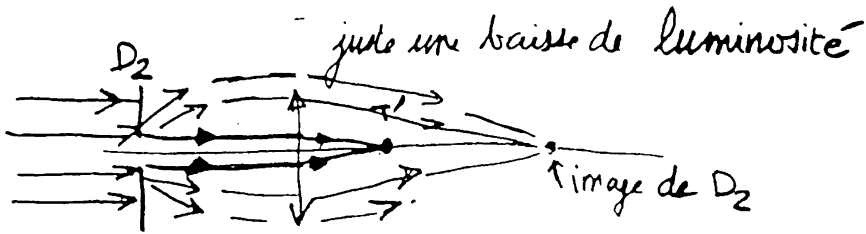
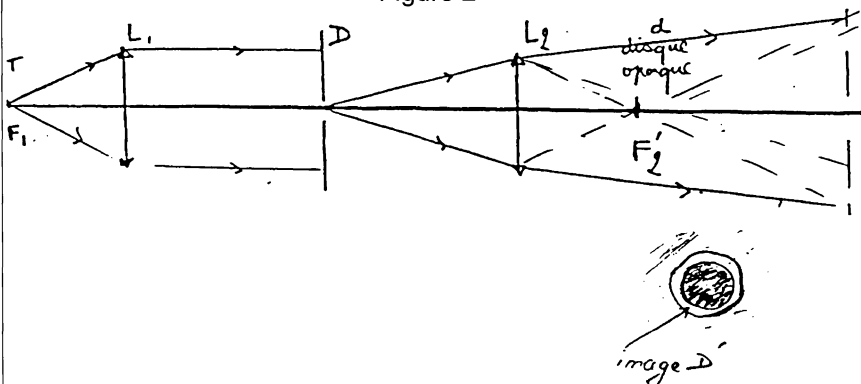


Figure 2



« Le diamètre du disque opaque est très inférieur à celui de l'image de D. On n'observe plus une tache circulaire mais un anneau lumineux autour d'un rond noir. »

Figure 3

À la question sur la forme de l'image du diaphragme « diffractant » quand une partie de la lumière issue de la lentille est arrêtée, on obtient un nombre élevé de non-réponses (32 %, N=37). Trois types de réponses sont données.

L'image est **identique** à celle obtenue en l'absence de disque (souvent, elle est dite moins lumineuse) (19 %) :

« *le cache ne gêne pas pour l'image géométrique de D_2* »

Ce type de réponse est compatible avec ce qui se passe dans le cas de la formation d'une image étendue en éclairage incohérent. Deux étudiants accompagnent leur réponse d'une construction graphique. Celle de la figure 1 de l'encadré 5 fait apparaître la décomposition de l'objet en points-objets mais tout se passe comme si ces points étaient incohérents. Celle de la figure 2 de l'encadré 5 concerne le niveau macroscopique : les rayons de propagation de l'énergie semblent indépendants.

L'image est différente (19 %). Un seul étudiant décrit précisément la forme de l'image (on voit les bords lumineux sur un fond noir) et fait référence à la strioscopie (ce qui est correct). Il n'explique pas pourquoi la forme a changé.

Le centre de l'image manque (30 %) :

« *non, le centre sera masqué* »

Comme dans la question portant sur la forme de l'image d'un diaphragme « diffractant », l'image semble être la projection de la figure de diffraction sur l'écran d'observation : le cache placé sur le centre de la figure de diffraction empêchant la lumière de passer, la figure observée sur l'écran n'a pas de centre. Cela apparaît sur la construction utilisée sur l'unique schéma fourni avec ce type de réponse (figure 3 de l'encadré 5). L'image n'est pas obtenue par décomposition de l'objet en points-objets (interprétation de Lord Rayleigh) ou par décomposition de l'onde émergente de l'ouverture sur une base d'ondes planes (interprétation d'Abbe).

Terminons ce point sur la forme de l'image d'un diaphragme « diffractant » en disant qu'il serait nécessaire de prolonger cette étude en augmentant l'effectif de la population interrogée. Par ailleurs l'image d'un trou « diffractant » obtenue par strioscopie étant proche de l'image tronquée prévue par les étudiants, il serait souhaitable de choisir comme ouverture « diffractante » non pas un trou mais une fente rectiligne.

3.5. Discussion

Les résultats précédents confirment les hypothèses faites quant à l'utilisation d'un raisonnement de nature « géométrique ». En effet :

1° Les étudiants restent au niveau macroscopique et suivent les rayons de propagation de l'énergie issus de la source au lieu de passer au niveau des ondes élémentaires et d'utiliser le principe de Huygens-Fresnel. Ces tendances se traduisent dans le cas présent par les erreurs suivantes :

- l'image d'un point à l'infini en présence de diffraction est derrière le plan focal image de la lentille d'observation ;
- l'image d'un diaphragme éclairé par un faisceau parallèle n'existe pas ou est confondue avec celle de la source.

2° Les quelques étudiants qui se placent au niveau des ondes élémentaires pour répondre aux questions sur l'image d'un diaphragme favorisent l'interprétation de Lord Rayleigh basée sur le concept de sources de Huygens au détriment de celle d'Abbe basée sur celui de composantes d'ondes planes : leur réponse est ainsi très voisine de celle donnée par le modèle géométrique.

3° Les rayons de propagation de l'énergie et les points objets que les étudiants font intervenir semblent être respectivement indépendants et incohérents. La situation de filtrage spatial en éclairage cohérent est assimilée à une situation de formation d'image en éclairage incohérent : l'image d'un diaphragme « diffractant », obtenue en présence d'un cache au foyer image de la lentille d'observation, est identique à celle obtenue en l'absence de cache.

Parallèlement à cette tendance vers un raisonnement de nature « géométrique », il est à noter l'existence d'une tendance vers une vision sélective de la formation des images. En effet, pour les étudiants :

- il ne peut y avoir d'image en présence de diffraction, que ce soit pour la source ponctuelle ou l'objet éclairé ;
- un objet éclairé en lumière parallèle a une image quand il « diffracte » la lumière. Il se pourrait que l'on retrouve ici la tendance à matérialiser les concepts dégagée lors de nos précédentes recherches sur la phase et la surface d'onde (Maurines, 1995, 1997a) et rejoignant celle mise en évidence par Bouwens (1987), Pérales et al (1989), Kaminsky (1989) à propos du rayon lumineux. Les étudiants traitent un objet éclairé comme une source de lumière et font intervenir les sources de Huygens pour positionner son image uniquement quand le faisceau lumineux issu de l'objet est divergeant, autrement dit quand ce faisceau ressemble à celui

issu d'une source usuelle de lumière. Toutes ces tendances pourraient traduire le fait noté par Smit & Finegold que pour les étudiants « *a model is depicted as being nearly similar to the real entity that serves as the subject of modelling* » (Smit & Finegold, 1995, p. 632).

Par ailleurs, on retrouve dans ces situations ondulatoires un raisonnement en termes d'image voyageuse, largement étudié dans des situations d'optique géométrique (Fawaz & Viennot, 1986 ; Goldberg & Mac Dermott, 1987 ; Feher & Rice, 1987 ; Kaminsky, 1989 ; Galili, 1996). L'image est considérée comme un tout : elle semble être la matérialisation sur un écran de l'objet qui voyage et se modifie au fur et à mesure des obstacles rencontrés sur son chemin. Ainsi, quand la diffraction ne peut être négligée quelque part dans un système optique, les images qui suivent sont toutes accompagnées de diffraction, comme si elles avaient gardé la mémoire de cette diffraction. L'image de la source n'existe pas, seule l'image du dernier obstacle rencontré (ici le diaphragme éclairé) existe. Le centre de l'image d'un diaphragme « diffractant » manque quand un petit cache est placé au foyer image de la lentille d'observation. Un seul rayon contribue à la formation de l'image d'un point.

3.6. Quelques remarques sur l'enseignement

En conclusion de cette étude sur la formation des images, nous voudrions montrer sur quelques points que l'enseignement actuel ne favorise pas une remise en cause de la tendance à utiliser un raisonnement de nature « géométrique » et que, sans doute, il induit les tendances à une vision sélective de la formation des images. En effet :

- en ce qui concerne la tendance à raisonner comme si la lumière était incohérente et à considérer des rayons d'énergie indépendants, certains manuels s'appuyant sur l'expérience de stioscopie pour introduire la diffraction ne précisent pas que la forme de l'image de l'objet éclairé est différente quand une partie de la lumière émergeant de la lentille est supprimée (Queyrel & Mesplède, 1996, p. 118) ;

- en ce qui concerne la tendance à considérer que seule la source a une image, ce n'est qu'à un niveau d'enseignement élevé qu'on s'intéresse aux images données par les objets intermédiaires d'un système optique. En optique géométrique, c'est lors de l'étude des pupilles et lucarnes d'entrée et de sortie que le problème se pose et encore le diaphragme apparaît-il plutôt comme limitateur de l'étendue d'un faisceau ou d'une image que comme objet transparent proprement dit. Ce n'est qu'en optique ondulatoire et dans des situations d'éclairage cohérent et de filtrage spatial qu'il est vraiment abordé sous cet angle ;

– en ce qui concerne la tendance à penser qu'un diaphragme éclairé en lumière parallèle a une image uniquement quand il « diffracte » la lumière, la plupart des manuels ne s'intéresse qu'à la forme et à la position de l'objet dont on cherche l'image, la nature matérielle de l'objet et à son interaction avec la lumière n'étant pas prises en compte. L'objet, quel qu'il soit, est assimilé à une source primaire, ponctuelle ou étendue, de lumière divergente. En ce qui concerne la tendance à faire intervenir les sources de Huygens uniquement quand le diaphragme « diffracte » la lumière, rares sont les livres montrant que le principe de Huygens-Fresnel peut être utilisé dans le cas de la propagation de la lumière à travers une « grande » ouverture ;

– en ce qui concerne la tendance à considérer que la formation des images et la diffraction sont deux phénomènes qui s'excluent, ce n'est qu'au niveau du deuxième cycle universitaire que ces deux phénomènes sont étudiés de manière conjointe. Dans les livres traitant des ondes et de la diffraction utilisés en premier cycle universitaire, il n'est pas toujours dit que la figure de diffraction observée dans le plan focal image de la lentille est l'image déformée par diffraction de la source à l'infini. Dans ceux traitant de l'optique géométrique, la déformation d'une image par diffraction n'est pas toujours mentionnée. Certaines définitions pourraient laisser penser qu'un point a une image uniquement si tous les rayons émergent d'un système optique se coupent en un seul point. Ainsi on lit : « *soit un système quelconque (S) et soit une source ponctuelle de lumière placée en A. Si toute la lumière issue de A vient converger après avoir traversé (S) en un point A', A' est l'image de A à travers (S)* » (Queyrel & Mesplède, 1995, p. 36). Par ailleurs, le concept de rayon semble être utilisable dans certains livres uniquement en absence de diffraction. Ainsi il est dit : « *dans un milieu isotrope, le rayon lumineux est défini par la droite normale à l'onde suivant laquelle l'énergie lumineuse se propage lorsqu'on néglige la diffraction* » (Pérez, 1994, p. 4), « *l'étude sommaire que nous venons de faire montre que pour pouvoir utiliser la notion de rayon lumineux, on doit considérer des faisceaux limités par des diaphragmes dont les dimensions linéaires sont grandes devant la longueur d'onde λ* » (Bertin et al, 1978, p. 6). Comme une image est obtenue en utilisant des rayons, se pourrait-il que les étudiants en concluent qu'en présence de diffraction, il n'y a pas d'image ?

Terminons ceci en signalant que les livres utilisés dans le premier cycle universitaire ne mentionnent pas le modèle spectral de la diffraction et ceci même lorsqu'il s'agit d'interpréter des expériences de filtrage spatial. Si ceux utilisés au deuxième cycle disent tous que la tache de diffraction observée dans le plan focal de la lentille correspond à la transformée de Fourier de l'amplitude de l'onde dans le plan de l'objet éclairé, rares sont ceux qui mentionnent l'interprétation d'Abbe et utilisent les schémas

correspondants. Il est d'ailleurs à noter que très peu de schémas sont utilisés dans les livres pour expliquer la formation des images. Seul un (Hecht, 1987), à notre connaissance, se distingue sur ce point.

CONCLUSION

Les résultats obtenus sur les situations présentées ici confirment les hypothèses faites quant à l'existence de tendances vers un raisonnement « géométrique » en termes d'objet. Il reste des questions à approfondir, notamment en ce qui concerne la tendance à considérer qu'une image ne peut exister en présence de diffraction et celle à raisonner en partant de l'onde émergeant de l'ouverture diffractante. La question se pose également d'examiner ce que deviennent les réponses des étudiants dans des situations de formation d'images en éclairage incohérent et pour des objets éclairés autres que des diaphragmes. C'est dans cette dernière direction que nous avons orienté nos recherches.

Nous concluons simplement en mettant l'accent sur les trois points qui suivent.

Étudier une situation ondulatoire aussi bien au niveau des ondes élémentaires qu'au niveau macroscopique devrait permettre aux étudiants de faire un lien entre ces deux niveaux, autrement dit de mettre en regard le niveau concerné par le raisonnement commun et celui sur lequel l'enseignement actuel se focalise. Il n'est évidemment pas question de s'intéresser aux rayons de propagation de l'énergie dans n'importe quelle situation, l'étude pouvant nécessiter l'utilisation d'un modèle ondulatoire vectoriel. On peut par contre mentionner les deux niveaux d'analyse et chercher les rayons de propagation d'énergie d'une onde en champ lointain. On pourrait ainsi construire la surface d'onde d'une onde émergeant d'une ouverture en utilisant le principe de Huygens et en déduire les rayons de propagation de l'énergie. Dans une situation d'interférence à deux ondes, on pourrait s'intéresser à la structure de l'onde résultante.

Utiliser dans une même situation géométrique, aussi bien le modèle ondulatoire que le modèle géométrique, devrait permettre aux étudiants de comprendre que le modèle ondulatoire n'est pas réservé aux seules situations ondulatoires et les aider à ne pas matérialiser les concepts. Ceci pourrait être fait non seulement dans la situation de propagation à travers une « grande » ouverture mais aussi dans celle de la formation de l'image d'un point.

Terminons ces quelques remarques en disant que pour éviter une vision sélective de la formation des images, on devrait introduire la notion

d'image en partant de l'expérience (c'est une « copie » de l'objet), s'attarder sur le concept d'objet en explicitant les facteurs le caractérisant et susceptibles d'être pertinents (non seulement sa position et sa forme mais aussi sa nature matérielle, son interaction avec la lumière, etc.), s'intéresser aux images des différents objets constituant un système optique (pas seulement la source, mais aussi les diaphragmes, les lentilles, etc.) bien avant l'étude de la diffraction et du filtrage spatial.

BIBLIOGRAPHIE

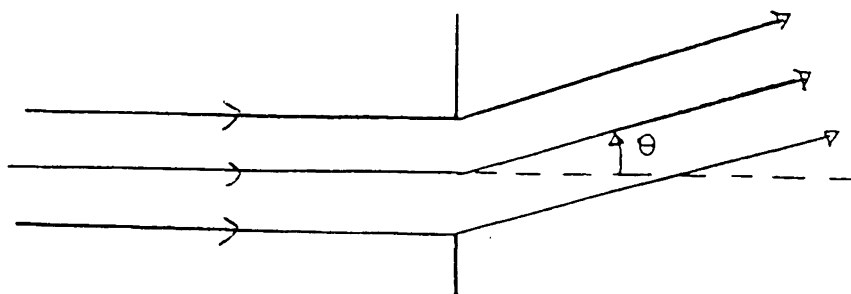
- BERTIN M., FAROUX J.-P. & RENAULT J. (1978). *Optique géométrique*. Paris, Dunod.
- BOIVIN A., DOW J. & WOLF E. (1967). Energy flow in the neighborhood of the focus of a coherent beam. *Journal of the Optical Society of America*, vol. 57, n° 10, pp. 1171-1175.
- BORN M. & WOLF E. (1980). *Principles of optics*. New York, Pergamon Press.
- BOUWENS R. (1987). Misconceptions among pupils regarding geometrical optics. In J.D. Novak (Éd.), *Proceedings of the Second International Conference on Misconceptions and Educational Strategies in Sciences and Mathematics*. Ithaca, Cornell University, vol. 3, pp. 23-38.
- DETTWILLER L. (1990). *Qu'est-ce que l'optique géométrique ? Fondements et applications*. Paris, Dunod.
- FAWAZ A. & VIENNOT L. (1986). Image optique et vision. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 686, pp. 1125-1146.
- FEHER E. & RICE K. (1987). A comparison of teacher-students conceptions in optics. In J.D. Novak (Éd.), *Proceedings of the Second International Conference on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*. Ithaca, Cornell University, vol. 2, pp. 108-117.
- FRANÇON M. (1972). *Optique, Formation et traitement des images*. Paris, Masson.
- GALILI I. (1996). Students'conceptual change in geometrical optics. *International Journal of Science Education*, vol. 18, n° 7, pp. 847-868.
- GOLDBERG F.M. & Mc DERMOTT L. (1987). An investigation of students' understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror. *American Journal of Physics*, vol. 55, n° 2, pp. 108-119.
- GOODMAN J.W. (1972). *Introduction à l'optique de Fourier et à l'holographie*. Paris, Masson.
- HECHT (1987). *Optics*. New York, Addison Wesley.
- KAMINSKY W. (1989). Conceptions des enfants et des autres sur la lumière. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 973-996.
- LINDER C. & ERICKSON G. (1989). A study of tertiary students' conceptualizations of sound. *International Journal of Science Education*, vol. 11, special issue, pp. 491-501.
- LINDER C. (1993). University physics students' conceptualizations of factors affecting the speed of sound propagation. *International Journal of Science Education*, vol. 15, n° 6, pp. 655-662.
- MAURINES L. (1986). *Premières notions sur la propagation des signaux mécaniques : analyse des difficultés des étudiants*. Thèse, Université Paris 7.
- MAURINES L. (1992). Spontaneous reasoning on the propagation of visible mechanical signals. *International Journal of Science Education*, vol. 14, n° 3, pp. 279-293.

- MAURINES L. (1992). Mécanique du son. In Actes du deuxième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques, *Tréma*, n° 3-4, pp. 77-91.
- MAURINES L. (1998). Les élèves et la propagation des signaux sonores. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 800, pp. 1-22.
- MAURINES L. (1995). Les étudiants et la phase d'une onde progressive : résultats d'une enquête exploratoire. In G. Mary & W. Kaminsky (Coord.), *Actes du cinquième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques*. Reims, Université de Reims-Champagne-Ardennes et IUFM de Reims, pp. 107-123.
- MAURINES L. (1997a). Students and the wave-geometrical model of the propagation of waves in a three dimensional medium. In *Proceedings of the first international conference of ESEERA, Research in Science Education in Europe*. Rome, Kluwer, p. 103-112.
- MAURINES L. (1997b). Raisonnement spontané sur la diffraction. In J. Gréa (Éd.), *Actes du sixième séminaire national de recherche en didactique de la physique, de la chimie et de la technologie*. Lyon, Université Lyon 1, pp. 77-95.
- MAURINES L. (1999a). La propagation des ondes en dimension trois : analyse des difficultés des étudiants quant au modèle géométrico-ondulatoire. *Didaskalia*, vol. 15, pp. 87-122.
- MAURINES L. (1999b). Les étudiants et les situations ondulatoires de formation des images. In A. Durey (Éd.), *Actes des premières rencontres scientifiques de l'ARDIST*. Cachan, LIREST-ENS de Cachan, pp. 144-149.
- PERALES F.J. & CAZORLA F.N. & CERVANTES A. (1989). Misconceptions on geometric optics and their association with relevant educational variables. *International Journal of Science Education*, vol. 11, n° 3, pp. 273-286.
- PEREZ J.P. (1994). *Optique*. Paris, Masson.
- QUEYREL J.-L. & MESPLEDE J. (1995). *Précis de physique, Optique, Première année*. Paris, Bréal.
- QUEYREL J.-L. & MESPLEDE J. (1996). *Précis de physique, Optique, Deuxième année*. Paris, Bréal.
- SMIT J.J.A. & FINEGOLD M. (1995). Models in physics : perceptions held by final-year prospective physical science teachers studying at South African universities. *International Journal of Science Education*, vol. 17, n° 5, pp. 621-634.

ANNEXE 1

Énoncé du questionnaire portant sur l'interprétation des schémas de diffraction de Fraunhofer

Un laser émettant une onde plane monochromatique est placé devant un écran percé d'une fente fine infiniment longue. Dans l'étude de la diffraction à l'infini de la lumière émise par le laser, on s'intéresse à l'intensité de la lumière se propageant dans une direction θ avec la direction incidente.



1) Les sources secondaires situées sur la fente diffractante dont parle le principe de Huygens-Fresnel et permettant de calculer l'intensité de la lumière dans la direction θ sont-elles en phase ?

oui non pourquoi ?

2) Les rayons dessinés après la fente diffractante sont-ils ceux d'une onde plane ?

oui pourquoi ? quelle est son amplitude ?

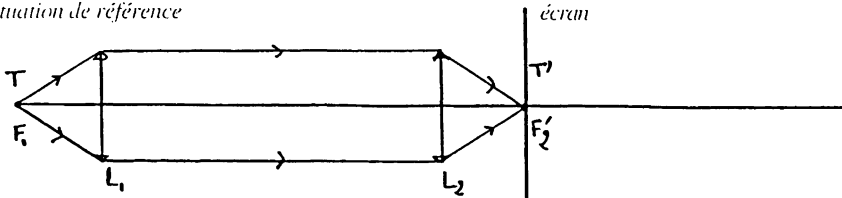
non pourquoi ? que représentent-ils ?

ANNEXE 2

Énoncé du questionnaire portant sur la formation des images en éclairage cohérent en présence ou en l'absence de diffraction

On éclaire un trou T grâce à une source de lumière jaune et à un condenseur (non représentés) et on fait l'image de T sur un écran E grâce à deux lentilles L_1 et L_2 de 10 cm de distance focale. Le trou T est dans le plan focal objet de la lentille L_1 (F_1 est le foyer objet de cette lentille) et l'écran E est dans le plan focal image de la lentille L_2 (F_2 est le foyer image de cette lentille).

situation de référence



On intercale entre les deux lentilles un écran percé d'un trou. Le trou D_1 est suffisamment grand pour que la diffraction puisse être négligée, le trou D_2 a un diamètre tel qu'on ne peut négliger la diffraction de la lumière.

schéma n° 1 : pas de diffraction

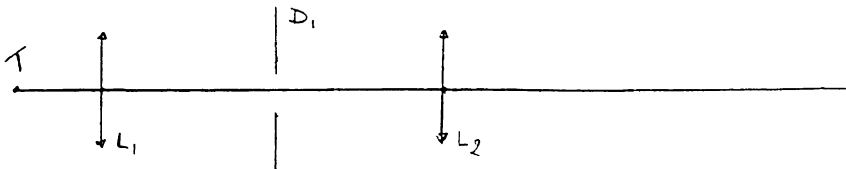
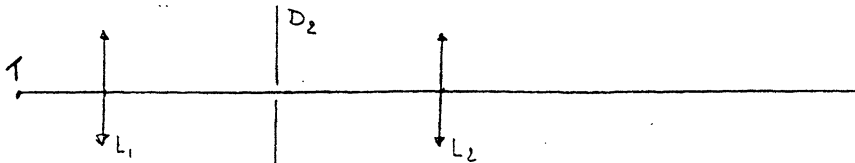


schéma n° 2 : diffraction



1) Peut-on observer l'image du trou source T ?

avec D_1 :

non, pourquoi ?

oui, pourquoi ? est-elle au même endroit que dans la situation de référence et de même forme ? oui, non, pourquoi ?

avec D_2 :

non, pourquoi ?

oui, pourquoi ? est-elle au même endroit que dans la situation de référence et de même forme ? oui, non, pourquoi ?

2) Peut-on observer l'image du trou D_1 ou D_2 intercalé entre les deux lentilles ?

cas de D_1 :

non, pourquoi ?

oui, pourquoi ? indiquer où sur le schéma n°1

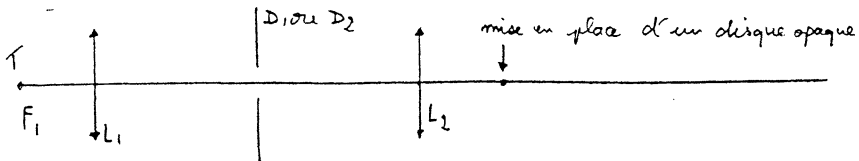
cas de D_2 :

non, pourquoi ,

oui, pourquoi ? indiquer où sur le schéma n°2

3) Si vous avez répondu à la question 1 que l'on peut observer une image du trou source T, répondez aux questions suivantes :

On recouvre entièrement l'image de T obtenue en présence de D_1 par un petit disque opaque et on utilise un disque identique pour recouvrir l'image de T obtenue en présence de D_2 .



Observe-t-on l'image du trou D_1 ?

non, pourquoi ?

oui, pourquoi ? est-elle identique à celle obtenue en l'absence de disque opaque ? oui non pourquoi ?

Observe-t-on l'image du trou D_2 ?

non, pourquoi ?

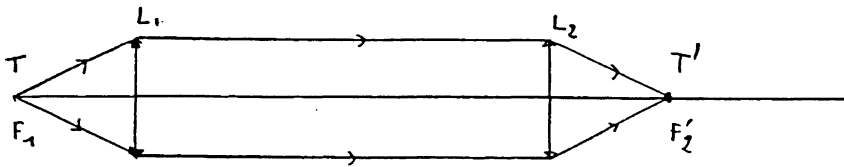
oui, pourquoi ? est-elle identique à celle obtenue en l'absence de disque opaque ? oui non pourquoi ?

ANNEXE 3

Énoncé du questionnaire portant sur la forme de l'image d'un diaphragme diffractant

On considère les situations suivantes :

situation 1



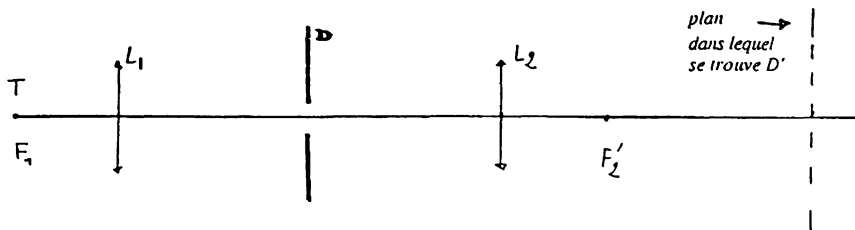
T est un trou éclairé à l'aide d'une source de lumière jaune et d'un condenseur (non représentés).

T' est l'image de T obtenue à l'aide des deux lentilles L_1 et L_2 de même distance focale.

Le trou est suffisamment petit pour que le faisceau lumineux émergent de la lentille L_1 soit parallèle à l'axe optique du système.

situation 2

On intercale à présent entre les deux lentilles un diaphragme circulaire D . Le diamètre de D est suffisamment petit pour que la diffraction de la lumière ne puisse être négligée. D' est l'image que donne la lentille L_2 du diaphragme D .



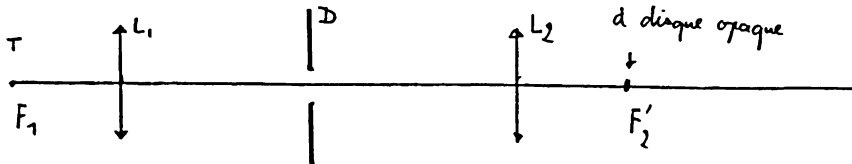
question : l'image D' du diaphragme D est-elle une tache circulaire ?

oui pourquoi ?

non pourquoi ? comment est-elle ?

situation 3

On place dans le plan focal image de la deuxième lentille un petit disque opaque d , centré en F'_2 , de telle sorte que l'image T' du trou source soit recouverte.



question : Observe-t-on encore une image D' ?

oui pourquoi ?

est-elle identique à l'image observée dans la situation 2 ? oui non

pourquoi ?

non pourquoi ?

Cet article a été reçu le 10/06/1998 et accepté le 16/12/1998.



Coordination des « représentations image » et des représentations rationnelles dans la construction du concept d'élément chimique

Coordination of picture representations and rational representations in the building of the concept of chemical element

Jean-Claude SALLABERRY

Laboratoire des Sciences de l'Éducation
116 bd Béranger, BP 4239
37042 Tours cedex 1, France.

Résumé

Après repérage de deux catégories de représentations (représentations « image », représentations rationnelles), après une approche de ce qui caractérise un concept scientifique, la construction du concept d'élément chimique est envisagée de deux points de vue : d'abord à partir de la chronique d'une formation en IUFM, ensuite d'un point de vue historique. L'hypothèse du caractère indispensable des représentations image dans l'élaboration du concept est illustrée à partir de leur présence et de leur coordination aux représentations rationnelles.

Mots clés : *représentation image, représentation rationnelle, bord, concept, élément chimique.*

Abstract

After observing two categories of the representation (picture representation, rational representation), after approaching the characterization of scientific concept, the building of the concept of chemical element is explored from two different perspectives. First, by discussing learning activities involving physical sciences student-teachers and, then, by adopting an historical perspective. The assumption concerning the essential role played by picture representation in this concept building is illustrated from their presence and coordination with rational representation.

Key words : *picture representation, rational representation, edge, concept, chemical element.*

Resumen

Después de detectar dos categorías de representaciones (representaciones «imagen», representaciones racionales) partiendo de una aproximación de lo que caracteriza un concepto científico, la construcción del concepto de elemento químico es enfocada desde dos puntos de vista: primero a partir de la crónica de una formación en IUFM y después desde un punto de vista histórico. La hipótesis del carácter indispensable de las representaciones imagen en la elaboración del concepto, es ilustrada a partir de su presencia y de su coordinación en las representaciones racionales.

Palabras claves : *representación imagen, representación racional, borde, concepto, elemento químico*

De nombreux travaux montrent l'intérêt du repérage des représentations de l'apprenant — voir par exemple Viennot (1976), Giordan (1983), Astolfi & Develay (1989), Johsua & Dupin (1993). Je voudrais, à propos d'un exemple — celui de la construction du concept d'élément chimique, mettre l'accent d'une part sur l'importance de représentations que l'on peut qualifier d'imagées, d'autre part sur la nécessité de leur coordination avec des représentations rationnelles. Je ne reprendrai pas les considérations que je développe ailleurs sur la possibilité de porter au concept la notion de représentation (Sallaberry, 1996a) ; il suffit en effet, pour la question que prétend aborder cet article, de s'appuyer sur le constat (expérimental) de l'existence de deux catégories de représentations.

1. « REPRÉSENTATIONS IMAGE », REPRÉSENTATIONS RATIONNELLES

1.1. Une catégorisation empirique des représentations

Il est relativement facile de repérer deux catégories de représentations en ce qui concerne un enseignement expérimental. Voici, à titre d'exemples, des réflexions d'élèves face à des expériences de chimie :

– « *c'est bleu* », « *c'est trouble* », « *c'est joli* », « *il y a des bulles* », « *il y a des étincelles* », etc. Il s'agit là d'énoncés qui renvoient à des choses vues ou visibles, à des représentations que je nomme représentations image (codées R1) ;

– « *c'est parce qu'il n'y a pas assez d'acide...* », « *si on chauffait la réaction se déclencherait...* » On peut repérer ici un aspect de début d'hypothèse : ces énoncés renvoient à ce que je nomme représentations à prétention interprétante (codées R2). L'idée d'une hypothèse induisant à elle seule un fonctionnement du type discours scientifique, les R2 peuvent être nommées représentations rationnelles.

Pour mieux différencier ces deux types de représentation, que j'ai d'abord repérés sur d'autres matériaux de recherche (voir Sallaberry, 1986), il est utile d'argumenter, au niveau théorique, la pertinence de la catégorisation proposée au niveau empirique. Au demeurant, un tel travail d'argumentation est indispensable : que des catégories permettent de structurer un corpus de recherche ne suffit pas à les justifier.

1.2. Dynamique R1, dynamique R2

Le premier argument théorique qui justifie l'opposition R1/R2 a trait à la question des bords c'est-à-dire de la limite entre une représentation et une autre.

Les R2, de par leur aspect hypothèse (ou, dans d'autres cas, de par leur aspect comparaison), s'inscrivent dans un souci de justification et de précision qui est celui du discours scientifique. Ce souci va exiger en permanence un *affinement des bords* : il faut préciser ce qu'une R2 désigne et ce qu'elle ne désigne pas, il faut préciser ses ressemblances et ses différences avec d'autres R2. La polysémie du langage constitue bien sûr une difficulté dans cette entreprise ; c'est pour cela que les sciences se sont donné des espaces de langage formel — celui des mathématiques, celui de la logique formelle. Il est toutefois possible, à l'extérieur d'un langage formel, de mener un travail de précision des énoncés. Il est même des cas

où l'on peut parvenir à des énoncés suffisamment précis pour permettre une démonstration — dont le domaine de prédilection est pourtant constitué par les langages formels. Ce travail de précision sur les énoncés correspond à un affinement des bords des représentations (de type R2).

Les R1, au contraire, ont des *bords flous*. Le propre d'une image, qu'elle soit picturale ou décrite à l'aide de mots, est justement de toujours faire penser à une autre. La photo d'une ville peut toujours faire penser à celle d'une autre ville. Le rouge de certains tableaux de Matisse a brusquement évoqué pour moi, il y a peu, le souvenir plus lointain des toiles de Soutine. À partir de leurs bords flous, les R1 installent, entre elles, un fonctionnement caractérisé par l'imprécision. Songeons à notre façon d'échanger lors d'une discussion amicale ou festive : nul ne se gêne pour reprendre « au vol » une idée, la pousser plus loin, la transformer... C'est ainsi qu'on « file la métaphore » et que du sens jaillit, pour le plus grand plaisir des sujets en présence. En reprenant l'un des exemples de R1 cités au paragraphe 1.1., on peut imaginer que des élèves soient tentés d'entamer une « classification » de réactions chimiques à partir d'un aspect imagé, comme la couleur bleue ou la production d'étincelles. Une telle catégorisation risque fort d'apparaître comme peu rigoureuse à un chimiste, parce qu'elle ne permet pas de classer les réactions selon des critères fiables. Le chimiste en question est, en fait, en train de reprocher à ces sortes de « catégories » de n'avoir pas des bords nets.

En résumé, les R1 sont caractérisées par des bords flous, et leur dynamique (le fonctionnement des R1 entre elles) est fondée sur cet aspect — c'est une dynamique à bords flous. Les R2 n'ont pas nécessairement des bords nets, mais entrent dans une dynamique d'affinement des bords. En fait, la catégorie des R2 prend en charge l'énorme investissement de la rationalité qui est le propre de la culture occidentale.

Bien entendu, bien d'autres catégorisations que l'opposition R1/R2 sont proposées, pour les représentations. Je les indique sans les développer, la question n'étant pas centrale ici. Bruner opte pour une répartition en trois catégories : représentations « *énactives, iconiques, symboliques* » (Bruner, 1966, p. 11) — il s'appuie en partie sur l'oeuvre de Piaget. Ce dernier, bien que ne s'étant pas directement préoccupé de classer les représentations, avance l'opposition *figuratif/opératif*. Vygotsky suggère de distinguer, au cours du développement, substitut *fonctionnel* et substitut *symbolique*. (Vygotsky, 1985, p.105). Freud distingue les représentations « de choses » liées au processus primaire et les représentations « de mots » correspondant au processus secondaire ; ce qui revient à l'opposition *inconscient/conscient*. Paivio en 1991, à partir d'une expérimentation concernant l'utilisation du langage, formalise un « double codage », ce qui correspondrait à l'utilisation

de *représentations image* et de *représentations verbales*. Le Ny (1985, 1989) oppose les représentations *naturelles* et les représentations *rationnelles* : l'opposition recouperait celle que l'on opère entre « raisonnement naturel » et « raisonnement logique ». Bresson (1987) retient les deux oppositions *déclaratif/procédural* et *analogique/non analogique* ; bien entendu, l'analogique correspond ici à tout ce qui est imagé, le non-analogique, ou arbitraire, à ce qui dépend du langage. Dans le domaine des sciences cognitives, à part Johnson-Laird (1993) qui propose des *modèles mentaux* qui sont à la fois imagés et rationnels, la plupart des auteurs reprennent l'opposition *modal/amodal*, qui n'est autre que l'opposition analogique/arbitraire (voir par exemple : Denis & de Vega, 1993). La question de la catégorisation est ainsi jalonnée de propositions — pour plus de précisions voir Sallaberry (1996a, 1996b, 1997). Si l'opposition *figuratif/opératif* est proche de la catégorisation R1/R2, les propositions du type *imagé/verbal* (ou *analogique/arbitraire*) situent la limite ailleurs. Si le principe de l'arbitraire du signe justifie la position de la limite, on peut leur reprocher

- de ne pas tenir compte de la différence entre un énoncé descriptif et une proposition logique ;
- de constituer une macro-catégorie, car la langue nous sert à tout – à décrire, à argumenter, à penser.

Les modèles qui rassemblent les aspects imagés et propositionnels se rapprochent des représentations composites. Par ailleurs, l'apport de la théorie psychanalytique suggère de tenir compte de la catégorie des représentations inconscientes (voir le paragraphe 1.3.).

1.3. L'argument du recadrage

1.3.1. Les représentations composites

Il faut mentionner l'existence de représentations qui combinent les propriétés des R1 et celles des R2, telles que les plans, les cartes, les graphiques et bien des schémas. On peut les qualifier de **composites**. En effet :

- il s'agit de documents graphiques, dessinés, donc d'images ;
- les propriétés du groupe des déplacements, les échelles, parfois des lois quantitatives ou certains langages conventionnels sont présents.

On peut considérer ces représentations comme la trace d'une pensée particulièrement efficace, parce que capable de coordonner dynamique R1 et dynamique R2. Les représentations qui correspondent à cette pensée puissante, ou pensée géométrique (voir Sallaberry, 1996a),

sont codées R3. Car le travail de la pensée pour conjoindre les images des lieux (mémorisées ou construites) et la vue de dessus (et de plus loin) qui fonde la carte constitue non seulement une coordination de R1 et de R2, mais aussi un travail dans lequel se coordonnent la dynamique R1 et la dynamique R2. Que chacun se souvienne de l'effort qu'il doit consentir pour faire correspondre les détails repérés lors d'une visite de plusieurs maisons avec un agent immobilier et l'observation des plans de ces maisons, une fois revenu chez lui. C'est un bon exemple de R3. Dans une telle opération, c'est la montée en puissance de la représentation que repère la difficulté.

L'utilisation coordonnée de la dynamique R1 et de la dynamique R2 doit amener la pensée à une efficacité maximum, par alliance d'une certaine fluidité facilitant les avancées et d'une certaine rigueur permettant de formaliser ces avancées.

Pour résumer les niveaux de représentation qui semblent pouvoir être repérés ou postulés, on peut distinguer, dans un ordre probablement génétique au sens piagétien, c'est-à-dire au sens où chaque niveau se construit à partir du ou des précédents :

- les représentations inconscientes,
- les R1,
- les R2,
- les R3 (coordinations actives R1-R2).

En tenant compte des travaux de Piaget, les représentations imagées (reproductrices) sont présentes dès l'apparition de la fonction symbolique, avant le niveau préopérateur : « ... *les images reproductrices se constituent dès le niveau préopérateur et même dès l'apparition de la fonction symbolique ...* » (Piaget & Inhelder, 1966, p. 414). Cet argument, ainsi que le fait de remarquer que les R1 sont proches de la description et de l'action, plaide en faveur d'une antériorité d'apparition des R1 vis à vis des R2. Les R2 se spécifiant de l'apparition de l'interprétation de type scientifique et donc de la comparaison, on peut travailler sur l'hypothèse qu'elles apparaissent au niveau préopérateur sous une forme peu élaborée, sinon embryonnaire. Ensuite, ces R2 vont se perfectionner. Mais en rappelant que Piaget & Inhelder repèrent une « *évolution non autonome des images* » (Piaget & Inhelder, 1966, p. 419) d'une part, « *une utilité ou même une nécessité de l'image pour le raisonnement* » (Piaget & Inhelder, 1966, p. 444) d'autre part, il est raisonnable de penser que les R1 et les R2 coopèrent, se perfectionnant simultanément et réciproquement. Ce qui ne signifie pas que les deux « logiques » se dissolvent. Voici donc un argument supplémentaire de prise en compte, pour la modélisation de la pensée, des coordinations R1-R2.

1.3.2. *L'argument du recadrage*

La prise en compte des niveaux logiques va fournir un autre argument. Bateson (1977), en proposant de concevoir les processus d'apprentissage comme s'organisant en plusieurs **niveaux logiques**, applique l'importante distinction entre une classe et un objet, introduite par les logiciens du Cercle de Vienne. Si le premier niveau pris en considération correspond à la réussite en acte, nous le nommerons apprentissage 1 (Bateson propose une première « numérotation », puis en change... L'important ici n'est pas de se mettre d'accord sur ce qui caractérise le « premier » niveau, mais de concevoir différents niveaux). Dans l'exemple du travail scolaire, la question à laquelle se confronte l'élève est suffisamment familière pour qu'il décide d'employer une démarche apprise. Du point de vue des représentations, il y a sans doute utilisation de R1 et de R2 « de base ». L'apprentissage 2 implique une décentration, un **recadrage**, un changement de niveau logique. Dans l'exemple de l'apprentissage scolaire, le sujet, par exemple, prend conscience que tel type de solution, pourtant d'habitude efficace, ne convient pas au problème qu'il doit résoudre. Cela signifie que des R2 élaborées interviennent. Des R2 élaborées, puisqu'il ne s'agit plus seulement d'amorcer une explication ou une relation de causalité, mais de concevoir des types de raisonnement, ainsi que des classes de problèmes pour lesquels ces raisonnements sont efficaces. Si le sujet conçoit que la solution qu'il possédait correspond à une classe de problèmes et que, découvrant un nouveau type de problème, il imagine qu'il va lui falloir trouver un autre type de solution, il opère un recadrage.

L'apprentissage 3 est un recadrage par rapport au processus de l'apprentissage 2. Par exemple, je me « vois » en train de penser que tel type de solution correspond à un type de problèmes, je fais éventuellement le lien avec des situations analogues que j'ai vécues.

Piaget (1979) propose un point de vue analogue avec ses trois abstractions :

- **l'abstraction empirique** porte sur les objets physiques extérieurs au sujet. Par rapport à la classification R1/R2, on peut dire qu'elle a toutes les chances de produire des R1, car d'un point de vue génétique les R1 sont plus proches des objets que les R2 ;

- **l'abstraction réfléchissante** est tirée des opérations mentales et des actions. Elle va, selon toute vraisemblance, faire intervenir des R2 et des coordinations R1-R2, dès que le sujet dépassera l'image de l'action ;

- **l'abstraction réfléchie** est en position « méta » par rapport à la précédente, elle est une sorte d'abstraction de l'abstraction réfléchissante. On peut donc prévoir qu'elle sera le domaine de prédilection des R2 et des coordinations R1-R2.

Peut-on considérer que l'on passe d'un niveau de représentation à l'autre par recadrage, c'est-à-dire par prise en compte d'un contexte ?

Le passage du niveau R2 (pensée rationnelle, liée à la dynamique d'affinement des bords) à une pensée capable d'allier les deux dynamiques constitue manifestement un recadrage. Ce qui justifie de concevoir un niveau R3 (représentations à structure R1-R2). Le passage des représentations inconscientes aux R1 peut-il être pensé comme un recadrage ? Il faut rappeler ici l'opposition posée par Freud — à propos de la première topique — entre représentation de choses et représentation de mots. La première correspond au processus primaire et à l'inconscient (il n'y a pas de langage). La seconde correspond au processus secondaire et au préconscient-conscient (le sujet peut utiliser le langage). Le changement permis par l'utilisation du langage constitue manifestement un recadrage : c'est l'entrée décisive d'un sujet dans une culture ! La transition des R1 aux R2 est moins facile à classer : pourquoi passer d'une dynamique où le sujet n'a pas trop le souci des bords (de ses représentations) à une dynamique d'affinement de ces bords constituerait-il un recadrage ? Eh bien, justement, sur la base de ce souci, qui implique une attention et une exigence nouvelles du sujet vis à vis des représentations qu'il a construites.

La liaison entre un recadrage et le passage d'un type de représentation à un autre devient, dès lors, un argument de poids pour justifier le choix de placement de la limite entre deux types de représentation, qui deviennent ainsi des niveaux de représentation. Une fois construit, cet argument constitue une justification de l'opposition R1/R2. On pourrait envisager qu'il puisse être utilisé dans le cadre d'autres hypothèses de catégorisation.

1.4. Première approche d'un concept scientifique

Avant d'aborder un exemple, il n'est pas inutile de tenter de caractériser ce qu'est un concept scientifique. Outre une approche métaphorique, trois apports différents seront utilisés, avant d'examiner en quoi la question des bords peut concerner le concept.

Un concept est d'abord un outil de la pensée : de la même manière qu'un outil permet de mieux travailler, un concept permet de mieux penser. Cette comparaison avec l'outil permet de prévoir une pertinence vis-à-vis de certaines situations. À l'instar du marteau et du maillet, qui font preuve d'une adaptation satisfaisante à une situation où il faut taper sur un objet, mais qui sont moins utiles s'il s'agit de limer ou poncer, un concept se révélera « puissant » pour certaines situations et moins pertinent pour d'autres.

1.4.1. L'apport de la didactique

Vergnaud (1985) considère que tout concept est caractérisé par une structure (S,I,S) :

- S renvoie aux situations pour lesquelles le concept est pertinent ;
- I désigne l'invariant qui justifie la construction du concept (les exemples de l'énergie, de la quantité de mouvement, suffisent à convaincre que souvent c'est le repérage d'un invariant qui déclenche l'élaboration d'un concept) ;
- S rappelle que tout concept est désigné par un mot, voire par une abréviation (symbolisation).

Vergnaud précise sa proposition, de deux façons :

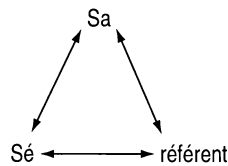
- il énonce une « *définition pragmatique* » du concept, en proposant de le concevoir comme « *l'ensemble des invariants utilisables dans l'action* » (Vergnaud, 1991, p. 145). Il faut, bien entendu, préciser l'action dont il est question, c'est-à-dire son champ d'application. L'auteur indique alors que la définition pragmatique fait appel « *à l'ensemble des situations qui constituent la référence de ses diverses propriétés, et à l'ensemble des schèmes mis en oeuvre par les sujets dans ces situations* » (Vergnaud, 1991, p. 145) ;

- il généralise, par rapport à la caractérisation de 1985, l'item I, qui devient « *l'ensemble des invariants sur lesquels repose l'opérationalité des schèmes* » (Vergnaud, 1991, p. 145) le schème étant défini comme l'organisation invariante de la conduite pour une classe de situations donnée.

Il n'est pas sûr que pour les concepts de la physique cette dernière généralisation soit pertinente, mais, après tout, on peut toujours considérer que, dans certains cas, l'ensemble des invariants se réduit à un invariant. Quant à l'ensemble des situations auquel fait référence la définition pragmatique, il peut constituer un « *champ conceptuel* » — « *ensemble de situations dont le traitement implique des schèmes, concepts et théorèmes, en étroite connexion, ainsi que les représentations langagières et symboliques susceptibles d'être utilisées pour les représenter* » (Vergnaud, 1995, p. 71). Nous verrons plus loin que les concepts d'atome et d'élément chimique appartiennent manifestement au même champ conceptuel. Vergnaud construit ainsi une théorie d'une grande cohérence, en s'appuyant sur la tradition piagétienne (référence à l'action et aux schèmes), mais en allant bien au delà.

1.4.2. *L'apport de la sémiologie*

Un autre apport pertinent, pour mieux caractériser le concept, est celui de la sémiologie. Peirce (1885) conçoit l'entité sémique (tout objet convoyeur de sens) selon une triade « *signifiant-signifié-référent* » — définis ici à partir de la position des sémiologues (voir Cuny, 1982 — Eco nomme ce schéma le triangle sémiotique (Eco, 1988, p. 66). Il signale que ces idées sont déjà repérables chez Platon et Aristote. On les retrouve aussi chez Locke (1751). Le triangle sémiotique peut être schématisé comme suit :



- le signifiant (*Sa*) constitue *l'aspect de saisie perceptive* (pour « comprendre » qu'il s'agit d'une pomme, par exemple, il faut que je saisisse (au sens informatique) le mot « pomme », ou une image, une photo, etc.) ;
- le signifié (*Sé*) est *l'aspect production de sens* : à partir du moment où j'ai « perçu » qu'il est question d'une pomme, je vais créer du sens. Ce sens dépend de mon humeur, de ma culture, de ce que j'ai vu et vécu le matin... On peut voir que si le *Sa* est un élément du code (de la langue si c'est le code utilisé), le *Sé* « appartient » en quelque sorte au sujet (qui parle, construit des représentations) ;
- le référent est l'objet que désigne le mot.

Dans une telle conception, le concept scientifique n'a pas de référent (concret) ; d'où la difficulté à le construire et à le faire construire par d'autres.

Il est toutefois possible de construire une conception moins classique du référent. Le cas du concept scientifique ne se situe plus alors comme une exception (voir Sallaberry, 1997).

1.4.3. *L'apport de la philosophie*

Un apport important est bien entendu celui de la philosophie, même si le concept philosophique n'a pas nécessairement les mêmes caractéristiques que le concept scientifique. Les précisions données par Lefèbre sont pertinentes pour le concept scientifique. « *Simultanément il*

(le concept) élucide et ses conditions immédiates et ses antécédents lointains. Cette double capacité — rétrospective et prospective — lui est essentielle. Tout concept condense une genèse qu'il implique... » (Lefèbvre, 1980, p. 15).

1.5. Concept et affinement des bords

Je qualifie de formel un concept défini à l'aide d'une formule, comme ceux de la physique ; car dans ce cas, ce que le concept désigne et ce qu'il ne désigne pas est clairement repéré ! Par ailleurs, les situations sur lesquelles le concept est pertinent peuvent être listées. Dit autrement, les bords du concept sont nets. Cet exemple des concepts de la physique permet de prévoir qu'au stade formel les concepts fonctionnent un peu, entre eux, comme les lettres de l'alphabet. Ce qui caractérise l'un, c'est avant tout de n'être aucun de tous les autres ; mais en même temps, ils sont tous reliés par un faisceau de relations. Un concept dont l'élaboration n'est pas terminée peut avoir des bords moins nets que ceux auxquels il vient d'être fait référence. Je propose de parler de *concept empirique* lorsque le concept sert simplement à structurer un *corpus* de recherche, de *concept théorique* quand le concept a été retravaillé à la lumière d'autres apports théoriques (d'autres auteurs). Dans ce dernier cas, la recension a permis de commencer à préciser les bords. Une notion, bien entendu, possède des bords nettement moins affinés que le concept. On peut considérer qu'elle constitue une étape dans la construction (« phylogénétique et ontogénétique ») de ce dernier. Dans les sciences humaines, il est difficile de construire des concepts aussi bien découpés ; ce qui n'est pas une raison pour ne pas tenter d'obtenir une précision plus grande !

2. LA CONSTRUCTION DU CONCEPT D'ÉLÉMENT CHIMIQUE

2.1. Une expérience de formation en IUFM

Un travail autour du concept d'élément chimique a pu être mené à l'IUFM d'Aquitaine, avec des étudiants préparant le CAPES (Certificat d'Aptitude au Professorat de l'Enseignement Secondaire) de Sciences Physiques. À raison de plusieurs groupes d'étudiants chaque année sur trois ans, le nombre de groupes à avoir participé à un tel travail est de l'ordre de la dizaine. Chaque groupe comprenait une vingtaine d'étudiants. Eu égard au plan de charge du travail à mener sur l'année, il était possible de consacrer une heure à préciser les **conceptions** (représentations

rationnelles, ou représentations comportant manifestement des aspects R2) construites par les étudiants en ce qui concerne le concept d'élément chimique.

À chaque fois, la difficulté qu'éprouvent les étudiants (licenciés) à définir le concept et repérer la notion d'élément est étonnante, du moins de prime abord. Car à la réflexion, puisqu'un concept se doit d'avoir des bords relativement nets, dès que l'on dépasse le stade du concept empirique, puisqu'il faut être capable, d'une part de préciser ce que le concept désigne et ce qu'il ne désigne pas, d'autre part d'indiquer le domaine de pertinence, on doit admettre que « définir » un concept suppose qu'au préalable on ait pu le construire, qu'on se soit confronté aux difficultés qui viennent d'être évoquées et qu'on ait pu les résoudre. Une notion, quant à elle, a des bords plus ou moins précis, elle précède le concept, dont elle annonce l'élaboration ; elle est proche du concept empirique (voir Sallaberry, 1996a). Le concept englobe la notion en la précisant ; une difficulté à repérer la notion est l'indice d'une difficulté de construction du concept.

La question (posée par le formateur) est du type : « *quelle est la définition de l'élément chimique ?* » (ou « *comment définissez-vous le concept d'élément chimique ?* »). Elle entraîne régulièrement hésitation et interrogation chez la plupart des étudiants. La réponse, énoncée plus ou moins rapidement après la question, est du type : « *un élément chimique est caractérisé par le nombre de charge Z* ». La nuance entre définition et caractérisation ne semble pas perçue. Or, un énoncé possible pour la définition est proche de la réponse précédente : « *l'élément est l'ensemble des particules (atomes ou ions) qui ont même nombre Z de protons* » (Viovy, 1984, p. 902). Si la différence entre les deux énoncés peut paraître légère, les degrés d'élaboration de la notion et donc du concept dont elle est l'indice peuvent être éloignés. Le concept est vraisemblablement construit lorsqu'il y a distinction entre sa caractérisation et sa définition.

Après un échange le plus libre possible à propos de ce que chacun croit pouvoir repérer, assurer, il apparaît que la difficulté est liée à une hésitation certaine à propos des relations entre la notion d'*élément* et celles d'*atome* d'une part, de *corps simple* d'autre part. Ce qui appelle aussitôt la remarque que le concept advient en général par *séparation*. Il suffit de songer à l'exemple de la température et de la chaleur. C'est à partir du XVIII^e siècle que les physiciens décident de nommer température une grandeur de type niveau, de type potentiel (grandeur intensive), et d'appeler chaleur une grandeur représentant un fluide qui s'échange (grandeur extensive) — de nommer, et donc de concevoir ces grandeurs, chacune dans son originalité, et les deux dans leurs relations. En effet le physicien, armé des deux concepts, peut décrire la mise en présence d'un corps à température élevée θ' (caillou par exemple) et d'un corps à température plus faible θ (une certaine

quantité d'eau) comme l'écoulement d'une certaine quantité de chaleur Q du caillou vers l'eau, jusqu'à ce que les températures des deux corps soient les mêmes (valeur θ). Un tel discours invente les concepts de température et de chaleur, en les séparant. La trace la plus fiable de leur non séparation d'antan nous est fournie par la langue, qui ne les sépare toujours pas : on dit encore d'un corps situé à une température élevée qu'il « est chaud »... Conséquence, construire le concept d'élément suppose bien sûr de pouvoir clairement repérer ce qui le distingue des concepts proches et ce qui l'y relie. Ce jeu ressemblance/différence constitue un excellent indice de l'effectuation de l'opération de séparation. Au demeurant, une telle opération suppose un tel jeu.

Une autre difficulté est liée aux deux approches possibles de la notion : l'approche expérimentale et l'approche théorique.

L'approche expérimentale a été choisie dans le cadre de l'enseignement du collège (voir Martinand & Viovy, 1979). Elle peut être construite sur l'exemple de la lame de cuivre métal plongée dans de l'acide nitrique, par constatation de la disparition du cuivre métal, de l'apparition de la couleur bleue turquoise de l'ion cuivre II et de la mise en évidence du possible passage au cuivre métal. Cette approche est fondamentale parce qu'amenant l'idée de conservation au cours de la réaction chimique (repérage de l'invariant). Il faut remarquer ici que les atomes se conservent eux aussi, pour l'essentiel, au cours d'une réaction. Les deux concepts (d'atome et d'élément) sont liés – ils appartiennent au même champ conceptuel. Le travail d'élaboration qui permet de passer de la notion au concept doit aider à les relier et à les distinguer.

L'approche théorique, ou structurale, caractérise un élément par Z , le nombre de charge.

Chacune des deux approches repère un invariant : dans le cas de l'approche expérimentale, c'est l'élément qui se conserve ; dans celui de l'approche structurale, c'est l'élément, bien sûr, mais plus précisément le noyau de l'atome qui se conserve. Par rapport à la structure (S,I,S) que propose Vergnaud (1985) pour le concept scientifique (Situations, Invariant, Symbole), les situations concernées sont les réactions chimiques, je viens de préciser l'invariant, le symbole est justement le symbole chimique, qui désigne chaque élément. Des références plus ou moins explicites à ces deux approches étant repérables dans les propos tenus par les étudiants, elles sont rappelées au cours du travail et situées vis-à-vis de l'enseignement (approche expérimentale en collège, approche théorique en lycée).

Au moment jugé le plus opportun par le formateur — le plus souvent, quand il semble que toutes les questions que peuvent se poser les membres du groupe ont été énoncées, que toutes les hésitations ont été repérées, et

qu'il est donc temps, après la déconstruction provoquée par le questionnement, d'amener des moyens pour reconstruire — une R1 est proposée. Penser le concept est, en effet, facilité par la belle métaphore proposée par la collection Hébert (1981), qui peut s'énoncer « ... *les atomes sont, d'une certaine manière, les « briques » de l'Univers, tout comme dans un jeu de construction ...* » (Hébert et al., 1981, p. 20). Il reste en effet à se poser des questions sur le nombre et sur la variété des briques... Puis sur ce qui est lié à la variété, à savoir les types de briques. Car penser l'élément comme un type de brique (un type d'atome) permet de le construire comme ce qui est commun à tous les atomes d'un même type. Partant, il est possible de distinguer atome et élément. Cela permet en même temps de penser la conjonction des deux approches : l'atome se conserve, à certains électrons périphériques près, au cours d'une réaction. Donc, le type d'atome se conserve également, ainsi que la grandeur qui caractérise ce type — la question des isotopes s'introduit sans problème quand le concept d'élément est construit. Les remarques précédentes constituent, bien entendu, à la fois un commentaire théorique de l'utilisation de l'image de la brique pour construire le concept et un résumé des échanges qui s'installent dans les groupes d'étudiants, suite à l'introduction de cette proposition.

Il suffit d'un exemple comme celui des molécules O_2 et O_3 pour camper la nuance élément/corps simple :

- ces deux molécules sont celles de deux corps simples (chacun ne contient qu'un seul élément, l'oxygène) ;
- ces deux corps simples sont différents (molécules différentes), bien que constitués du même élément.

La pertinence de l'utilisation de modèles (atomiques et moléculaires) pour permettre à chacun « d'accrocher » des images aux notions et aux exemples qui viennent d'être utilisés est bien entendu soulignée. La séance de travail comporte toujours une rapide perspective sur la construction historique du concept (voir paragraphe 2.2.), en général après l'échange qui vient d'être décrit.

Il m'est arrivé de regretter de ne pas avoir fait remplir des questionnaires après ce genre de travail. Il est vrai que le biais introduit par ce genre de pratique juste après apprentissage aurait soulevé des critiques de taille. Ce qui peut être retenu, en repensant à l'étonnement de la plupart des étudiants lorsqu'il s'agit de distinguer concept et caractérisation (voir paragraphe 2.2.) c'est que la séance de travail a permis la confrontation des diverses conceptions et la mise à disposition d'outils. Chaque étudiant, après une telle réflexion collective, est à même de s'appuyer sur des oppositions (corps simple/corps composé, atome/élément) clarifiées, ainsi que sur des représentations image (R1) coordonnées à des représentations

rationnelles (R2) — donc sur des coordinations R1-R2. On peut ainsi raisonnablement penser que les conditions pour construire le concept d'élément chimique sont réunies, et repérées par les acteurs — eu égard à la construction du champ conceptuel (voir paragraphe 1.4.1.), le repérage de ce qui relie et de ce qui oppose *atome* et *élément* est primordial.

2.2. Repérages sur la construction historique du concept d'élément chimique

Face à ces considérations quant à la construction du concept par des étudiants, il est intéressant de tenir compte du parcours qui a été celui de l'espèce humaine, quant à l'élaboration du dit concept. Une rapide perspective historique montre que si Aristote propose une interaction de quatre « aspects » organisés en deux oppositions (froid/chaud, sec/humide) pour obtenir les quatre « éléments fondamentaux » (terre, air, eau, feu), des hypothèses à propos de la matière ont été formulées, avant lui, par les présocratiques. Empédocle pensait que ces quatre éléments étaient régis par deux principes antagonistes (amour et discorde). Quant à l'école de Milet, elle « *se caractérise justement par cette recherche de l'élément primordial, de l'archè comme l'appelaient les Grecs, duquel seraient ensuite issues toutes les choses* » (De Crescenzo, 1988, p. 37 ; voir aussi Dumont, 1988 ; Lloyd, 1943). L'*archè* est ainsi conçue en tant que brique élémentaire permettant la construction de l'Univers.

La métaphore de la brique (Hébert) peut ainsi être référée à l'école de Milet. Bien entendu, le terme « élément » n'est plus utilisé avec le même sens. Mais ne pas repérer ces étapes dans le processus de construction historique constituerait une erreur.

Anaxagore concevait la matière comme constituée d'*homéoméries* spécifiques à chaque substance et divisibles à l'infini. Quant à Leucippe et Démocrite, ils ont au contraire pensé la matière comme constituée d'atomes (insécables) — voir de Crescenzo (1988) et Bensaube-Vincent (1984). En évitant de s'étendre sur l'histoire de l'élaboration, sur ses difficultés et ses obstacles, il faut tout de même citer l'étape clef que constitue l'opposition corps composé/corps simple, proposée par Lavoisier. Le concept advient de façon décisive avec les apports de Mendeleïev et de Moseley, puisque désormais chaque élément correspond à un type d'atome, l'indice proposé pour la caractérisation étant le nombre de masse, puis le nombre de charge. En effet, l'apport de Mendeleïev, avec la classification périodique des éléments, n'est pas seulement fondamental parce qu'apportant une base à toute conception systématique de la chimie. Il crée la possibilité d'accès du concept d'élément chimique à un langage formel : grâce à la séparation

nette entre éléments chimiques différents, ceux-ci vont rentrer dans un jeu différenciation/comparaison, ou opposition/comparaison, analogue à celui des lettres de l'alphabet. L'élément sodium se spécifie de n'être aucun des 91 autres éléments naturels, comme la lettre « a » se spécifie de n'être aucune des 25 autres lettres. En même temps, l'élément sodium, appartenant à la première colonne de la classification périodique, aura des propriétés chimiques analogues à celles des autres éléments de cette colonne (un peu comme la lettre a appartient au sous-ensemble des voyelles). Autrement dit, les éléments entrent dans un système de signes et l'écriture chimique devient possible (voir Sallaberry, 1993c).

L'utilité des considérations de ce paragraphe consiste principalement à montrer, sur l'exemple du concept d'élément chimique (à propos de son élaboration historique comme à propos d'une possibilité de construction personnelle) que les R1 (représentations image) peuvent être d'une grande utilité pour construire des concepts, donc pour concevoir. Elles sont alors étroitement coordonnées à des R2 (représentations rationnelles). Comme il a été déjà signalé, les cartes, les graphiques, les plans, comportent des aspects R1 (il y a de l'image) et des aspects R2 (présence d'une métrique et d'un code logique — type de projection, schémas conventionnels, etc.) Ils constituent pour cette raison de bons exemples de représentations composites (R1 et R2 à la fois). Nous venons de voir, à propos de l'élément chimique — qu'il s'agisse de son élaboration historique ou d'un exemple de travail à propos de la construction du concept — l'importance de telles coordinations R1-R2.

Cela dit, peut-on penser que si les R1 sont importantes lors de l'élaboration conceptuelle, il est préférable de « s'en débarrasser » ensuite ? Cette idée, proche des conceptions de Bachelard (voir paragraphe 3), semble un peu « rapide ». La suite va défendre « l'importance permanente » des R1, en illustrant divers moments de leur fonctionnement.

3. L'IMPORTANCE DES R1 DANS LA CONSTRUCTION DU CONCEPT

3.1. Le cas de la construction historique du concept d'élément chimique

On peut être sensible à la prégnance des représentations image au cours de l'élaboration diachronique, historique, de la notion. Ce n'est guère étonnant. L'exemple célèbre choisi par Bachelard pour illustrer ce qu'il nomme un « *obstacle verbal* » (Bachelard, 1938), l'éponge, fonctionne sur

une analogie dont les aspects imagés sont le moteur. Il parle d'ailleurs plus loin de « *rapide image* », à propos d'un autre exemple. Les aspects rationnels sont pourtant bien présents. En termes de représentations, cela signifie que si les R1 sont omniprésentes, elles sont souvent, aussi, coordonnées à des R2. Dès lors, il devient pertinent de chercher à repérer les coordinations R1-R2.

On peut en effet considérer que les questions fondamentales sont posées, dès les présocratiques : la métaphore de la brique, introduite de fait par les penseurs de Milet, n'est pas qu'une image. L'opposition des présocratiques entre l'*arché*, la brique unique fondement de l'Univers, et les *homéoméries*, multiples et divisibles, n'est pas seulement une opposition entre représentations image mais entre *conceptions*, c'est-à-dire aussi entre représentations rationnelles — ce choix de terminologie revient à poser qu'une conception est plus travaillée, plus construite qu'une R1, et qu'elle fait donc intervenir, aussi, des R2. Elle pose, en effet, deux questions fondamentales :

- qu'est-ce qui se conserve ?
- à quel « niveau » se situe la *segmentation* pertinente ? (décrire la construction d'une maison en termes d'empilement de briques est satisfaisant : le niveau de segmentation de la brique convient donc, en ce qui concerne une maison).

Or ces deux questions sont au centre de la modélisation théorique qu'amènent les concepts d'atome et d'élément. Segmenter au niveau des atomes — la divisibilité de la matière ne s'arrête pas là — est pertinent pour décrire la réaction chimique. L'explicitier en tant que regroupement d'atomes, c'est à la fois montrer cette pertinence et s'appuyer sur la conservation des atomes et des éléments. Les présocratiques n'avaient pas les moyens de répondre de manière satisfaisante aux deux questions. L'argument pertinent quant au choix de niveau de segmentation, par exemple, s'appuie sur la possibilité de mesure de l'énergie mise en jeu dans la réaction chimique : puisqu'elle est de l'ordre de grandeur de celle des électrons périphériques, il est licite de segmenter au niveau des atomes. Ce qui est remarquable, c'est que les questions pertinentes aient pu être posées.

3.2. Le cas d'une construction à partir de coordinations R1-R2

Dans le domaine de la didactique, nous allons souvent trouver une certaine méfiance vis à vis des R1. Cette attitude peut s'appuyer sur Bachelard qui va jusqu'à déconseiller de monter des expériences trop belles,

pour que l'image de l'expérience gêne moins la construction de la pensée scientifique. Il souligne avec raison que cette dernière s'élabore plutôt en « contre », en opposition à la première impression ; il se méfie ainsi du spectaculaire. En critiquant l'empirisme de la première électricité, il écrit « *c'est un empirisme coloré. Il n'y a pas à le comprendre, il faut seulement le voir.* » (Bachelard, 1938, p. 30).

La question qui se pose mérite quelques précisions. D'une part la pensée se construit en opposition à la première impression, donc aussi à partir d'elle ; d'autre part les R1 sont à la fois, en général, plus proches du réel (l'image a un aspect de copie) et antérieures aux R2 (au cours du développement du sujet, l'accès aux R2 se construit plus tard que l'utilisation de R1 (voir Sallaberry, 1996). Doit-on penser qu'après leur rôle utile dans l'élaboration de concepts ou de R2 à bords assez précis, il est préférable — pour penser mieux — de ne plus avoir recours aux R1 ? Une telle « lutte iconoclaste » amènerait, dans le cas de l'exemple relaté au paragraphe 2.1., à utiliser l'image de la brique dans un premier temps, puis à tenter de l'éliminer ensuite. La même position recommanderait, dans l'enseignement, de n'utiliser les modèles moléculaires qu'en accompagnant cet usage d'exhortations à la méfiance et à la nécessité de construire d'autres représentations...

Cette question recoupe le débat entre Einstein, Bohr, De Broglie, etc., à propos des « images » en physique (De Broglie parle de « représentations concrètes ») — voir par exemple De Broglie (1967), Bohr (1958). En restant dans le cadre qui est celui de cet article (la dynamique des représentations dans la construction d'un concept) deux arguments plaident en faveur de l'utilité permanente des R1.

Le premier est que l'enseignement scientifique se fixe pour objectif la capacité de généralisation liée au concept (et aux R2 à bords nets), mais aussi la possibilité d'appliquer le savoir à des situations réelles et diverses. Or, les représentations les plus immédiates sont des R1 ; plus élaborées, elles seront vraisemblablement composites (R1 et R2 à la fois). Par exemple, une situation sera d'abord représentée sous forme d'image, puis, après élaboration, sous forme de croquis ou de schéma (qui ont des aspects image et des aspects rationnels).

Le second est que ces représentations composites sont, sans doute, la trace d'une pensée particulièrement puissante, alliant la fluidité des R1 à l'efficacité des R2 (voir Sallaberry, 1996). Plus généralement, cette possibilité d'utiliser simultanément la dynamique R1 (dynamique de représentations à bords flous) et la dynamique R2 (dynamique d'affinement des bords) constitue un recadrage du point de vue de l'approche systémique (un recadrage correspond à la prise en compte du contexte). Utiliser de front

les deux dynamiques constitue un recadrage, parce qu'un tel fonctionnement nécessite une certaine prise de distance par rapport à chacune des deux dynamiques. En poussant plus loin l'argument, les R2 correspondent bien à un recadrage vis-à-vis des R1, grâce au recul qu'implique la comparaison ou l'interprétation ; mais pour qu'il y ait recadrage, il faut que les R1 restent présentes, tout en étant relativisées.

Les R1 liées à la construction du savoir sont ainsi doublement utiles : en tant que ponctuant l'élaboration (et permettant ainsi de la réitérer) et en tant qu'exemples de R1 liées à une situation — leur présence facilitant alors la recherche d'autres exemples, d'autres applications. La seule raison que le pédagogue pourrait invoquer pour tenter de les éliminer serait l'éventuelle contradiction entre une R1 et le modèle théorique. Dans l'exemple qui nous concerne, la distance entre la métaphore de la brique et l'atome laisse peu de risque de « pollution » de la représentation de l'atome par l'image de la brique.

CONCLUSION

Nous avons pu vérifier que la catégorisation des représentations en représentations image (R1) et représentations rationnelles (R2) pouvait, au delà du repérage empirique, se justifier par une argumentation théorique. Cette classification peut dès lors aider à clarifier ce qui caractérise un concept scientifique. À partir de la chronique d'un travail d'élucidation des représentations que construisent des étudiants du concept d'élément chimique, à partir de rapides considérations historiques à propos de l'élaboration de ce concept, il est possible de mettre en évidence le rôle que peuvent jouer les R1. Ce rôle est inséparable des coordinations entre R1 et R2. Une forme de conclusion pourrait consister à énoncer l'hypothèse que de telles constructions (de concepts) ont (toutes) besoin des R1 et des coordinations R1-R2.

BIBLIOGRAPHIE

- ASTOLFI J.-P. & DEVELAY M. (1989). *La Didactique des sciences*. Paris, PUF.
BACHELARD G. (1980). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin [1938].
BATESON G. (1977). *Vers une écologie de l'esprit, tome 1*. Paris, Seuil.
BATESON G. (1980). *Vers une écologie de l'esprit, tome 2*. Paris, Seuil.
BENSAUDE-VINCENT B. (1984). Regards sur l'histoire de l'élément chimique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 666, pp. 1273-1284.
BOHR N. (1991). *Physique atomique et connaissance humaine*. Paris, Gallimard [1958].

- BRESSON F.(1987). Les fonctions de représentation et de communication. In J. Piaget, P. Mounoud & J.-P. Bronckart (Éds), *Encyclopédie de la Pléiade Psychologie*. Paris, Gallimard, pp. 933-982.
- BRUNER J.S., GOODNOW J.J. & GREENFIELD P.M. (1966). *Studies in cognitive growth*. New York, Wiley and son.
- BRUNER J.S. (1983). *Le développement de l'enfant, savoir faire savoir dire*. Paris, PUF.
- CUNY X.(1982). La fonction sémique dans le travail.Thèse, Université Bordeaux II.
- DE BROGLIE L. (1967). Les représentations concrètes en microphysique. In J. Piaget (Dir.), *Logique et connaissance scientifique*. Paris, Gallimard, pp. 706-778.
- DE CRESCENZO L. (1988). *Les grands philosophes de la Grèce antique*. Paris, Julliard.
- DENIS M. & DE VEGA M. (1993). Modèles mentaux et imagerie mentale. In M.-F. Ehrlich, H. Tardieu & M. Cavazza (Coord.), *Les modèles mentaux approche cognitive des représentations*. Paris, Masson, pp. 79-100.
- DUMON J.-P.(1988). *Les écoles présocratiques*. Paris, Gallimard.
- ECO U. (1988). *Sémiotique et philosophie du langage*. Paris, PUF.
- GIORDAN A. (1983). Les représentations des élèves : outils pour la pédagogie. *Cahiers Pédagogiques*, n° 214, pp. 26-28.
- HÉBERT A. (1981). *Chimie 2de*. Paris, Technique et Vulgarisation.
- JOHNSON-LAIRD P.N. (1993). La théorie des modèles mentaux. In M.-F. Ehrlich, H. Tardieu & M. Cavazza (Coord.), *Les modèles mentaux, approche cognitive des représentations*. Paris, Masson, pp. 1-22.
- JOHNSUA S. & DUPIN J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris, PUF.
- LEFÉBVRE H. (1980). *La présence et l'absence : contribution à la théorie des représentations*. Tournai, Casterman.
- LE NY J.-F. (1985). Comment (se) représenter les représentations. *Psychologie Française*, n° 30, pp. 231-238.
- LE NY J.-F. (1989). *Science cognitive et compréhension du langage*. Paris, PUF.
- LOCKE J. (1751). *Essai sur l'entendement humain*. Londres, Jean Nourse.
- LLOYD G.E.R. (1990). *Une histoire de la science grecque*. Paris, La Découverte.
- MARTINAND J.-L. & VIOVY R. (1979). La notion d'élément chimique en classe de cinquième : difficultés, ressources et propositions. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 613, pp. 878-884.
- PAIVIO A. (1991). *Images in mind : The evolution of a theory*. New York, Harvester Wheatsheaf.
- PEIRCE C.S. (1978). *Écrits sur le signe*. Paris, Seuil.
- PIAGET J. & INHELDER B. (1991). *L'image mentale chez l'enfant*. Paris, PUF.
- SALLABERRY J.-C. (1986). *Atelier-création sonore et sémiologie*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux II.
- SALLABERRY J.-C. (1993c). Écriture chimique et sémiologie. In A. Bargellini & P.E. Todesco (Éds), *Actes de la Seconde Conférence Internationale de Recherche sur l'Enseignement de la Chimie, Société Internationale de Chimie*. Pise, Université de Pise, pp. 419-424.
- SALLABERRY J.-C. (1996a). *Dynamique des représentations dans la formation*. Paris, L'Harmattan.
- SALLABERRY J.-C. (1996b). Modèles de la Représentation. In B. N'Kaoua (Éd.), *Actes du Deuxième Colloque Sciences Cognitives-Façade Atlantique, Biarritz, 21-23 novembre 1996, « Mémoire, Langage, Représentation — Modèles et statut des modèles. »*. Bordeaux, Presses Universitaires de Bordeaux, pp. 128-139.

- SALLABERRY J.-C. (1997). La représentation en questions. *Spirale, numéro hors série « Représentations en formation »*, pp. 11-36.
- VERGNAUD G. (1985). Concepts et schèmes dans une théorie opératoire de la représentation. *Psychologie Française*, n° 30, pp. 245-252.
- VERGNAUD G. (1991). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en didactique des mathématiques*, n° 10, pp. 133-170.
- VERGNAUD G. (1995). Théorie et concepts fondamentaux. In G. Vergnaud (Coord.), *Apprentissages et Didactiques, où en est-on ?* Paris, Hachette, pp. 63-80.
- VIENNOT L. (1976). Intuition et formalismes en dynamique élémentaire. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 587, pp. 49-84.
- VIOVY R. (1984). La notion d'élément chimique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 663, pp. 901-910.
- VYGOTSKY L.S. (1985). *Pensée et langage*. Paris, Messidor.
- VYGOTSKY L.S. (1998). *Traité des émotions*. Paris, L'Harmattan.

Cet article a été reçu le 15/06/1998 et accepté le 5/01/1999.

L'algorithmisation-refuge, obstacle à la conceptualisation L'exemple de la thermochimie en 1^{er} cycle universitaire

**To take refuge in algorithms an obstacle
to conceptualization
The example of thermochemistry in
freshman chemistry course**

Roger BARLET, Géraldine MASTROT

LIDSE
Université Joseph Fourier, Grenoble 1
BP 53
38041 Grenoble cedex, France.

Résumé

Dans le cadre des exercices quantitatifs en chimie et de leur modelage par le type d'évaluation dominant à l'Université, ce texte étudie les rapports entre l'algorithmisation et la thermochimie en premier cycle universitaire. L'étude a été menée à partir des manuels et de l'analyse des réponses à un questionnaire enseignant et un questionnaire étudiant. Elle montre, de façon convergente, que l'aspect calculatoire, à travers des algorithmes de résolution très reproductifs, l'emporte sur la conceptualisation. Si les étudiants s'adaptent assez bien, à l'intérieur du contrat didactique classique,

aux procédures algorithmiques, ils présentent, en revanche, un important déficit conceptuel et une méconnaissance des fondements de ces procédures. Diverses propositions didactiques destinées à favoriser l'apprentissage-appropriation sont explicitées.

Mots clés : *algorithmisation, conceptualisation, thermochimie, contrat didactique, évaluation.*

Abstract

First, we remind the importance of quantitative exercises in chemistry and their adjustment by the main evaluation mode at University. Then, the study of relationship between algorithmization and thermochemistry in first year of university is accomplished through textbooks, questions to know views of teachers and tests for students. The present study shows that calculatory aspect is prevailing over conceptualization. Students, within education contract, shows good adaptability to use algorithmic procedures but are failing in conceptual understanding of the background of these procedures. Propositions, in education field, are made to favorize understanding, particularly by use of qualitative evaluation focused on concepts and phenomens and by a dialectic relation between concepts as tools of resolution and as objects of learning.

Key words : *algorithmization, conceptualization, thermochemistry, education contract, évaluation.*

Resumen

En el marco de los ejercicios cuantitativos en química y de su modelaje por el tipo de evaluación dominante en la Universidad, este texto estudia las relaciones entre la algoritmización y la termoquímica en el 1er ciclo universitario. El estudio ha sido realizado a partir de manuales y del análisis de las respuestas obtenidas de un cuestionario aplicado a los docentes y otro a los estudiantes. La investigación muestra, de manera convergente, que el aspecto calculatorio, a través de los algoritmos de resolución muy reproductivos, lo lleva a la conceptualización. Si los estudiantes se adaptan bien, al interior del contrato didáctico clásico, a los procedimientos algorítmicos, ellos presentan, por el contrario, un importante déficit conceptual y un desconocimiento de los fundamentos de esos procedimientos. Diversas proposiciones didácticas destinadas a favorecer el aprendizaje-apropiación son explicadas.

Palabras claves : *algoritmización, conceptualización, termoquímica, contrato didáctico, evaluación.*

INTRODUCTION

Dans l'apprentissage scientifique les mécanismes cognitifs peuvent être mobilisés de façon duale. Leur mobilisation un peu mécanique, sans implication personnelle, par simple application de formules, relève d'un apprentissage passif et transmissif. Au contraire, leur mobilisation dans une démarche d'appropriation active, de résolution de problèmes, relève du schéma d'apprentissage constructiviste permettant d'affronter et éventuellement de franchir les obstacles cognitifs et didactiques.

La chimie, science éminemment expérimentale, présente, sur le plan de l'apprentissage, une **entrée qualitative et modélisée**, fondée sur la compréhension des nombreux faits expérimentaux, et une **entrée quantitative** exploitant des mesures et des calculs liés aux phénomènes observés, même si cette entrée est moins lourde qu'en physique. Mais ces deux entrées peuvent être pénétrées, l'une comme l'autre, de cette dualité transmission/construction, passivité/activité.

Les **algorithmes de résolution des problèmes quantitatifs**, dans lesquels les procédés ou les techniques mis en oeuvre occupent un espace pédagogique important, peuvent déboucher, en fonction de la dualité précédente, sur des obstacles ou difficultés de nature didactique.

Ce sont ces obstacles que nous proposons d'analyser, à partir d'une expérimentation menée en premier cycle scientifique universitaire (Mastrot, 1995), dans le domaine de la thermochimie c'est-à-dire des échanges d'énergie thermique qui accompagnent les réactions chimiques.

1. CADRE THÉORIQUE D'ÉTUDE : LES RAPPORTS ENTRE ALGORITHMISATION ET ÉVALUATION

1.1. Les exercices quantitatifs en chimie

La résolution des exercices de chimie quantitative, impliquant formules, expressions et applications numériques, fait maintenant partie du *fonds commun* d'apprentissage du lycéen ou de l'étudiant. Cette pratique « coutumière » d'exercices-types est largement modélée par le mode d'évaluation, tel qu'il fonctionne au baccalauréat ou dans les premiers cycles universitaires.

Pourtant l'exercice-type ne fonde pas toujours un réel apprentissage. La prégnance des programmes et des examens débouche trop souvent sur la mise en oeuvre d'exercices prototypiques et sur la capacité à reproduire des formules prêtes à l'emploi, particulièrement en première

année d'université. En DEUG première année¹ il nous semble en effet que la modularisation et le cloisonnement des savoirs qui lui est souvent lié favorisent cette tendance. La mobilisation d'algorithmes prend ainsi le pas sur la capacité à résoudre de véritables problèmes de chimie. Nous entendons par algorithmes des procédures automatiques de calcul, appliquées selon des schémas types, sans contextualisation de la situation expérimentale et sans évaluation des limites de la modélisation utilisée.

Une prise de conscience nette de ces difficultés s'est faite jour et s'est affirmée au début des années 90 (Pickering, 1990 ; Goffard, 1993). Elle a été rappelée récemment (Schowb & Blondel, 1996) : l'enseignement d'algorithmes de résolution ne suffit pas à assurer l'acquisition conceptuelle nécessaire à la compréhension profonde de la chimie. On a pu montrer également que l'évaluation par la résolution de problèmes peut renforcer l'approche symbolique, distincte des approches macroscopique ou microscopique, et qu'elle est porteuse d'intérêt didactique (Laugier & Dumon, 1994).

À l'arrivée à l'Université, il faut ajouter, à ce constat d'ensemble, l'existence, chez les lycéens, de conceptions relatives à la réaction chimique et aux changements d'état (Anderson, 1990) ainsi que le défaut de construction du concept de substance (Solomonidou & Stavridou, 1994).

1.2. Le contrat didactique et « la fiction didactique »

Dans la transposition didactique « interne » c'est-à-dire dans le passage du « *savoir à enseigner* » au « *savoir enseigné* », l'appropriation des connaissances est sous la dépendance du contrat didactique. « *Pour Y. Chevallard le contrat didactique définit les droits et devoirs des élèves, les droits et devoirs de l'enseignant et, par cette division des tâches, partage et limite les responsabilités de chacun* » (Bessot & Le Thi Hoai, 1994, p. 39).

Dans ce contrat, largement implicite, l'activité de préparation aux examens partiels ou aux examens de fin d'année, telle qu'elle s'exerce dans les travaux dirigés à l'Université, tient une place essentielle. Si l'examen porte sur des types d'exercices différents, l'étudiant ressentira cet écart comme une rupture du contrat et reprochera aux enseignants de recourir à des contrôles non conformes aux activités de l'année.

Il s'agit donc moins pour l'étudiant d'accéder à un approfondissement des connaissances que de passer en revue les différents algorithmes à mettre en oeuvre pour répondre à une situation d'évaluation précise et s'y préparer sans surprise. L'enseignant accompagne souvent cette dérive.

C'est dans ce cadre, sous la pression du contrat didactique, que s'opère la création d'algorithmes : « *Le maître montre l'algorithme, l'élève l'apprend et « l'applique » correctement* » (Brousseau, 1986, p. 61).

Ce processus pèse lourdement dans l'enseignement des sciences, pour Chevallard et al., « *la domination par les élèves de formalismes, de procédures fiables et d'algorithmes est en tout état de cause un objectif majeur d'un enseignement scientifique* » (Johsua & Dupin, 1993, p. 342). Le recours à des algorithmes est largement revendiqué pour la résolution des problèmes de chimie à condition qu'ils soient utilisés comme simples outils (Schrader, 1987).

Ce processus d'algorithmisation, qu'il ne s'agit pas de récuser *a priori*, est un mode de fonctionnement adapté aux contraintes du système didactique (programmes, faible volume du temps didactique, cloisonnement des enseignements, etc.) comme le prouve sa longévité et sa position souvent hégémonique.

Au total, l'enseignant, dans le cadre du contrat didactique, propose aux étudiants des algorithmes censés faciliter l'apprentissage des concepts abordés. L'étudiant, de son côté, se contente d'appliquer et de reproduire sans chercher à donner du sens à l'algorithme. On est alors en pleine « fiction didactique » :

- l'enseignant croit procurer à l'étudiant les moyens de parvenir à un véritable apprentissage ;
- l'étudiant pense avoir acquis les concepts dont il est question parce qu'il les manipule à travers des algorithmes qu'il est davantage capable de répéter que d'adapter à des situations nouvelles.

2. CHAMP D'ÉTUDE : LA THERMOCHIMIE EN PREMIÈRE ANNÉE DE DEUG

2.1. Les difficultés didactiques de la thermodynamique chimique

En thermodynamique chimique émergent de nombreuses difficultés conceptuelles, langagières et calculatoires. L'observation régulière de résultats médiocres dans ce domaine est une constante des évaluations en première année d'Université. On peut observer que les publications concernant la didactique de la thermodynamique chimique sont relativement rares, spécialement en ce qui concerne le premier principe réputé beaucoup moins problématique pour les étudiants que le second principe. La littérature

relève cependant les nombreuses difficultés, relatives aux deux principes de la thermodynamique. En y ajoutant notre propre perception on peut en dresser la typologie suivante :

- charge d'abstraction très lourde (Onillon, 1985) qui requiert le niveau des opérations formelles de Piaget ;
- dualité abstraction-application à des problèmes concrets (Balesdent, 1985) ;
- formalisme mathématique et axiomatisation (Lesoult, 1985 ; Sanfeld, 1988) ;
- terminologie complexe et rigoureuse dont un bel exemple est donné par l'utilisation des états de référence ;
- notion de fonctions d'état dont les variations, indépendantes du chemin suivi, sont entièrement définies par l'état initial et l'état final et qui sont caractérisées sur le plan mathématique par l'existence d'une différentielle totale exacte ;
- définition des grandeurs thermodynamiques pour une mole d'avancement ;
- distinction entre chaleur, travail et température (Tripp, 1976 ; Rist, 1985 ; Barrow, 1988) ;
- changement d'état, « chaleur latente » de changement d'état ;
- notion de réversibilité thermodynamique difficile à représenter expérimentalement et source de confusion avec l'équilibre chimique.

Plusieurs auteurs suggèrent de « *bâtir la thermodynamique sur le concret et son explication* » (Bertrand, 1988, p. 12) et pensent que la clé de la compréhension de cette discipline passe par l'appréciation de son lien intime avec l'expérience (Blandamer & Burgess, 1987). D'autres n'hésitent pas soit à déconseiller l'enseignement de la thermodynamique en première année d'Université, du fait de son caractère théorique, soit à proposer un enseignement amputé (étude de la loi de Hess et de ses applications quantitatives sans connaissance de la fonction d'état ou de l'enthalpie) (Battino, 1979). Plusieurs stratégies pédagogiques apparaissent donc possibles.

2.2. Le choix d'étude de la thermochimie

Nous avons choisi de limiter notre champ d'étude au premier principe et à l'utilisation des grandeurs thermodynamiques U (énergie interne) et H (enthalpie), appliquées aux échanges de chaleur accompagnant les réactions chimiques.

Cette limitation de notre champ d'investigation à la thermochimie nous paraît ainsi de nature à permettre une meilleure analyse des obstacles. La thermochimie est bien représentative des obstacles conceptuels qui apparaissent dans l'enseignement de la thermodynamique et relève point par point de chacune des difficultés précisées plus haut. Elle s'arrête cependant à un premier palier permettant de mieux circonscrire ces difficultés en évitant l'abstraction et la mathématisation supplémentaires liées à l'entropie, à l'enthalpie libre, à l'énergie libre et au potentiel thermodynamique.

L'étude dans le champ de la thermochimie, en première année d'Université, est d'autant plus intéressante que cette discipline n'est pas traitée, en tant que telle, au lycée. Quelques notions sur l'énergie et sa conservation ainsi qu'un peu de calorimétrie ont été introduites au secondaire, en première S (première scientifique) dans les programmes de 1988 et dans les nouveaux programmes de 1993, avec dans ce dernier cas, la définition de la chaleur de réaction et « *une première interprétation en relation avec les énergies moyennes de liaison* » (Bulletin officiel de l'Éducation nationale du 24 septembre 1992, p. 48).

À l'entrée de l'Université la « chance » de la thermochimie est donc d'avoir été à peine entrevue et de ne véhiculer que peu d'obstacles didactiques, en particulier ceux liés à la terminologie et à la charge d'abstraction. Elle reste alors largement une découverte.

2.3. Trois hypothèses de recherche

Dans la perspective d'une telle étude d'analyse du processus d'algorithmisation, nous avons cherché à vérifier trois hypothèses de recherche.

Première hypothèse : elle s'inscrit dans le droit fil de l'analyse introductive sur algorithmisation et évaluation. En première année d'Université l'enseignement du premier principe conduit à privilégier, sous la pression du mode d'évaluation, l'apprentissage de procédures et de méthodes de calcul. La compréhension globale des phénomènes et des concepts reste alors à la charge de l'étudiant.

Deuxième hypothèse : les étudiants ne relient pas entre elles les différentes notions enseignées en thermochimie en particulier premier principe, fonction d'état, loi de Hess et calcul des chaleurs de réaction.

Troisième hypothèse : les étudiants sont en mesure de résoudre un exercice mobilisant les méthodes de détermination indirecte des chaleurs de réaction, c'est-à-dire les algorithmes nécessaires, mais face à un exercice

« innovant », par défaut de conceptualisation, ils ne savent pas adapter ces algorithmes.

L'analyse du texte du savoir (programmes et manuels précisant le savoir à enseigner) et des réponses à un questionnaire auprès des enseignants (savoir enseigné) permettra de tester la première hypothèse. L'analyse des réponses des étudiants à un questionnaire en trois parties sur la thermochimie permettra de tester la deuxième et la troisième hypothèse.

3. ÉTUDE DU SAVOIR À ENSEIGNER ET DU SAVOIR ENSEIGNÉ

Les données analysées sur le « savoir à enseigner » ont été recueillies d'une part à partir des programmes de première année d'Université, en liaison avec les programmes du lycée, d'autre part à partir des manuels universitaires. Le « savoir enseigné » est analysé à partir des résultats d'un questionnaire proposé aux enseignants.

3.1. Les programmes

Notre expérimentation a été menée avec des étudiants de première année lors de l'année universitaire 94-95. Ces étudiants ont donc accompli leur scolarité au lycée, en particulier en première S, dans le cadre du programme de 1988. C'est donc ce programme que nous examinerons avant de nous intéresser aux changements apportés par les nouveaux programmes en 1993.

3.1.1. Première S

Dans les programmes de 1988 la conservation de l'énergie est abordée par des exemples de transformation de travail en chaleur (exemple : freinage d'un véhicule). Il s'agit de montrer que travail et chaleur « *ont un rôle équivalent du point de vue bilan énergétique et que l'énergie se conserve globalement* » (supplément au Bulletin officiel de l'Éducation nationale, n° 21 du 2 juin 1988, pp. 63-64). En calorimétrie, abordée en travaux pratiques, on montre que la production de chaleur peut être due aux réactions chimiques (combustions). La chaleur peut être fournie ou absorbée par le système. Elle peut entraîner une augmentation de température ou un changement d'état à température constante. Il doit être précisé que « *le bilan calorimétrique ne dépend que de l'état initial et de l'état final.* » (supplément au Bulletin officiel de l'Éducation nationale, n° 21 du 2 juin 1988, p. 64).

Dans les programmes de 1993 la notion de conservation de l'énergie est présentée en chimie sous le thème « *réactions chimiques et énergie thermique* ». On définit la chaleur de réaction et on donne « *une première interprétation en relation avec les énergies moyennes de liaison* » (Bulletin officiel de l'Éducation nationale, hors série du 24 septembre 1992, p. 48). On applique alors les notions de chaleur massique ($Q = mC\Delta t$) et de chaleur latente ($Q = mL$) et on montre que le bilan calorimétrique ne dépend que des états initial et final. On recommande cependant de ne pas introduire le terme d'enthalpie.

La présentation des premières notions de thermodynamique est donc plus large et la compréhension physique est favorisée par des liens étroits entre les phénomènes thermiques observables et le niveau microscopique. À noter cependant que dans le cadre d'un allègement des programmes, actuellement à l'ordre du jour, l'enseignement de l'énergie en chimie serait sensiblement réduit.

3.1.2. Première année de DEUG

Il n'existe pas au niveau universitaire de programme national officiel, tout au plus un « programme commun minimum de chimie » découpé en trois parties :

- 1er principe, énergie interne, enthalpie, détermination des chaleurs de réaction ;
- 2ème principe, ordre, désordre, entropie, enthalpie libre, sens d'évolution spontanée d'une réaction ;
- équilibres chimiques, application aux solutions aqueuses.

Les objectifs d'enseignement, relatifs à la première partie, sont précisés en termes de capacité à « *définir une fonction d'état, repérer le sens des échanges d'énergie, la chaleur échangée lors d'un changement de température et/ou d'un changement d'état, calculer une chaleur de réaction à partir des enthalpies d'autres réactions par un cycle de Hess ou une combinaison algébrique de ces réactions* » (Université Joseph Fourier, 1986, p. 3).

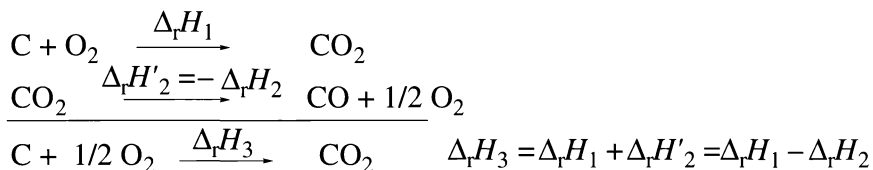
Les connaissances de base semblent donc plutôt axées sur des savoir-faire (« calculer ») que sur la compréhension de ces savoirs.

3.2. Les manuels

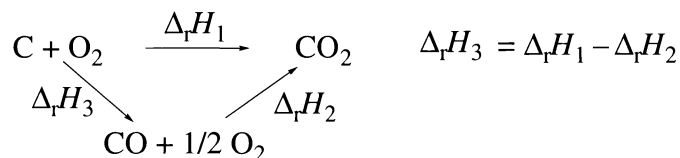
Puisque la découverte de la thermochimie, dans son côté abstrait et conceptuel, se fait à l'Université, nous avons analysé quelques ouvrages

universitaires connus en portant notre attention sur la thermochimie et en particulier sur les deux méthodes de calcul des chaleurs de réaction qui se retrouvent dans tous les manuels :

– *la méthode algébrique* résultant de la combinaison algébrique d'équations-bilans (exemple ci-dessous du calcul de l'enthalpie de formation de CO),



– *le cycle de Hess* où l'un des deux chemins thermodynamiques, entre un même état initial et un même état final, comporte la formation de l'espèce considérée (ici CO)



Les deux méthodes, assez semblables pour cet exemple simple, se distinguent très vite pour des cas plus complexes. La méthode algébrique comporte un poids algorithmique plus élevé tandis que la schématisation par chemins thermodynamiques intègre davantage de conceptualisation (fonction d'état, changement d'état et de température) comme en témoignent d'autres études sur les rapports schéma-concepts (Mottet, 1996 ; Beaufils et al, 1996).

Nous avons comparé treize manuels de niveau premier cycle, parus entre 1928 et 1995 et dont près de la moitié sont anglophones, sur les points suivants :

- quel est l'énoncé formulé pour la loi de Hess ?
- quelles sont les méthodes proposées pour le calcul des chaleurs de réaction ?
- dans ce calcul, la liaison est-elle faite avec l'aspect expérimental, le premier principe et le concept de fonction d'état (+ indique liaison, - absence de liaison, + - liaison non explicite, - + liaison avant l'énoncé de la loi) ?

auteur	année	énoncé loi de Hess	méthodes	liaison avec		
				exp.,	1 ^{er} princ.,	f. état
Butler	1928	Q_v et $Q_p = f(E_i - E_f)$	alg.+cycle	+	-	+ -
Gallais	1950	Q_v et $Q_p = f(E_i - E_f)$	alg.	+	-	+ -
Barrow	1961	non énoncée	alg. + cycle	+	+	+
Mahan	1963	ΔH indép.étapes	alg.	+	-	+
Ander & Sonnessa	1965	Q_v et $Q_p = f(E_i - E_f)$	alg.	+	+	+
Suard et al.	1971	Q_v et $Q_p = f(E_i - E_f)$	alg.+cycle	+	-	-
Arnaud	1988	Q_v et $Q_p = f(E_i - E_f)$	alg.+ cycle	+	+	- +
Huntz & Meyer	1988	non énoncé	cycle	-	-	-
Laffitte & Rouquérol	1990	$\Delta_r H = \sum \Delta_r H$	alg.	+	-	-
Fabritius	1990	$\Delta_r H = \sum \nu_i \Delta_r H$	cycle	-	-	-
Atkins	1992	$\Delta_r H = \sum \Delta_r H_i$	alg.	-	+	+
Mc Quarrie & Rock	1992	$\Delta_r H = \sum \Delta_r H_i$	alg.	-	-	+
Tuech et al.	1995	$\Delta_r H = \sum \Delta_r H_i$	alg.	-	+ -	+

Tableau 1 : Le savoir à enseigner en thermochimie à travers les manuels

On voit que la loi de Hess est énoncée de différentes façons, avec un énoncé plus ou moins mathématique (soit différence entre état final et état initial soit sommation algébrique de grandeurs enthalpiques relatives à des composés ou à des réactions).

Sur le plan des méthodes de détermination des chaleurs de réaction, malgré ses limites la méthode algébrique est davantage utilisée que le cycle de Hess « *la méthode algébrique est dépourvue de toute signification chimique mais a l'avantage d'être efficace* » (Suard et al., 1971, p. 164) ou présentée comme strictement équivalente (Arnaud, 1988, pp. 328-329).

Seulement un tiers des manuels explicitent que la loi de Hess et les méthodes qui en découlent sont des conséquences du premier principe tandis que plus de la moitié, bien que brièvement, mentionnent que l'enthalpie est une grandeur d'état.

Un tiers des manuels analysés ne parlent ni du premier principe, ni des fonctions d'état à propos des méthodes utilisées et trois d'entre eux, parmi les plus récents (Huntz & Meyer, 1988 ; Laffitte & Rouquérol, 1990 ; Fabritius, 1990), ont une présentation assez mathématisée avec le risque d'offrir des formules « recettes ».

En conclusion, alors que la conservation de l'énergie liée au premier principe devrait être un concept central, elle n'intervient que dans l'introduction à la thermochimie et disparaît plus ou moins au profit d'une mathématisation excessive et d'algorithmes de calcul. Il semble bien que **l'aspect opératoire** des calculs prenne le pas sur la **conceptualisation globale**.

3.3. Questionnaire proposé aux enseignants

Une enquête sur le savoir enseigné en thermochimie a été lancée auprès de 70 enseignants de diverses universités. Nous avons eu les réponses de 31 d'entre eux dont 29 enseignaient uniquement en premier cycle (une majorité des réponses provenaient de Grenoble, quelques-unes de Toulouse, Strasbourg et Orsay). Le questionnaire-enquête comportait 6 questions (voir en annexe 1) et les réponses peuvent être regroupées de la façon qui suit.

3.3.1. Loi de Hess

Deux formulations étaient proposées dans la question 1 :

- formulation 1 (F_1) = *la chaleur produite ou absorbée par une réaction ne dépend que de l'état initial et de l'état final ...* ;
- formulation 2 (F_2) = *l'enthalpie d'une réaction est égale à la somme algébrique des enthalpies de formation ...*

Les réponses sont les suivantes (tableau 2) :

Formulation 1	Formulation 2	Formulation 1 et 2	Autres formulations
45,2 %	32,2 %	9,6 %	12,8 %

Tableau 2 : **Pourcentages des réponses données au questionnaire (loi de Hess)**

La formulation 1 (Arnaud) constitue le premier choix parce qu'elle est bien reliée à la notion de fonction d'état, à condition, précisent quelques enseignants, de remplacer « chaleur » par « enthalpie ».

La formulation 2 (Lafitte & Rouquérol) est choisie par une minorité importante parce qu'elle est simple, claire, adaptée aux calculs et facile à mémoriser.

3.3.2. Méthodes de détermination indirecte des chaleurs de réaction

Question 2a

méthode 1	cycle de Hess	réponse M ₁
méthode 2	combinaison algébrique d'équations de réaction	réponse M ₂
méthode 3	formule $\Delta_r H^\circ = \sum \nu_i \Delta_f H^\circ_i$	réponse M ₃

Les réponses sont très partagées. Une moitié des enseignants choisit l'ensemble des méthodes tandis que l'autre moitié écarte l'une des méthodes (tableau 3).

M1	M2	M3	M1+M2+M3	M1+M2	M2+M3	M1+M3
83,9 %	74,2 %	80,6 %	48,4 %	19,3 %	6,4 %	16,1 %

Tableau 3 : Pourcentages des réponses données au questionnaire (détermination des chaleurs de réaction)

Les raisons de ces choix, lorsqu'elles sont explicitées, sont les suivantes :

- donner à l'étudiant les 3 méthodes et le laisser choisir (19 %) ;
- adapter la méthode au problème (29 %) ;
- apprendre à résoudre un problème de plusieurs façons (7 %).

Les enseignants ne considèrent donc pas que le cycle de Hess ait des vertus propres mais ils souhaitent que leurs étudiants puissent le choisir et élargir ainsi leur savoir-faire.

Question 2 c

La liaison avec la propriété des fonctions d'état est majoritairement faite et paraît un peu plus facile avec le cycle de Hess (77 % contre 61 % pour les méthodes 2 et 3).

Question 3 : comparaison entre M₁ et M₂

Majoritairement (71 %) les enseignants disent montrer l'équivalence des deux méthodes mais ils ne sont que 58 % à les comparer explicitement. Les enseignants pensent que les étudiants préfèrent M₂ (25,8 %) à M₁ (12,9 %) mais, dans un examen, ils affirment très largement leur laisser le choix de la méthode (74,2 %).

Question 4 : liaison avec le 1^{er} principe

À la question « Expliquez vous que c'est le 1er principe qui fonde

ces méthodes » la réponse est très largement positive (83,9 %). Si on se réfère à l'analyse des manuels, donnant des résultats beaucoup moins positifs, on peut penser que les enseignants ne réalisent pas que, dans leur enseignement, cette liaison n'est peut être pas aussi explicite qu'ils le pensent.

3.3.3. Intérêt, difficultés et extensivité du cycle de Hess

Question 5 : intérêt didactique du cycle de Hess

Il est remarquable de constater que 28 enseignants sur 31 voient plus d'intérêt didactique au cycle de Hess (M_1) qu'à la méthode algébrique (M_2). Les raisons données sont les suivantes :

- visualisation concrète plutôt qu'abstraction (pour 20 d'entre eux) ;
- limitation des automatismes et sollicitation de l'imagination (pour 12) ;
- généralisation plus facile (pour 10) ;
- meilleure compréhension physique (pour 10).

Les enseignants pensent que l'utilisation limitée du cycle de Hess, par les étudiants, réside dans la difficulté de sa construction et la rigueur qu'il implique avec comme difficultés secondaires les erreurs de signes et l'oubli des coefficients multiplicateurs adéquats.

Question 6 : autres utilisations du cycle

Le cycle est cependant largement utilisé pour le calcul des énergies réticulaires ou de $\Delta_r H^\circ$ avec changement de température (dans l'un et l'autre cas, 26 enseignants sur 31) et pour le calcul des énergies de liaison (22 enseignants).

3.3.4. Conclusion

Les enseignants disent expliciter les liens des diverses méthodes avec le premier principe et les fonctions d'état et apprécier **l'intérêt didactique du cycle de Hess**. En même temps, ils en mesurent les **limites** dans le cadre des **contraintes d'enseignement** et de la pression du contrat didactique. En témoigne ce commentaire « *la méthode du cycle est plus intéressante car plus formatrice mais plus longue et plus difficile à élaborer. La méthode algébrique est plus systématique et demande donc moins de réflexion. Malgré cela, par manque de temps, je me cantonne à cette seconde méthode.* »

4. ÉTUDE DES DIFFICULTÉS D'APPRENTISSAGE DES ÉTUDIANTS

4.1. Nature des données recueillies par questionnaire

Après les limites didactiques, montrées par l'étude des manuels et l'enquête auprès des enseignants, il était nécessaire de cerner avec plus de précision le savoir étudiant afin d'évaluer le degré de validation de nos hypothèses 2 et 3 de recherche. Pour cela un questionnaire a été élaboré après une pré-expérimentation, organisée dans un des groupes de travaux dirigés (TD) du DEUG A₁². Dans sa forme définitive (annexe 2) il comporte trois parties utilisant chacune une forme de questionnement différente :

- **la première partie**, relative à la *comparaison entre « méthode algébrique » et « méthode du cycle »* est composée de questions à choix multiples ou à réponses ouvertes courtes ;

- **la deuxième partie**, est un *exercice de résolution* au moyen du cycle de *Hess* ;

- **la troisième partie** est un Q-sort (items à réponse pondérée entre - 2, pas du tout d'accord et + 2, tout à fait d'accord) destiné à vérifier les degrés de certitude vis-à-vis des différentes affirmations proposées et à mesurer le *niveau de maîtrise conceptuelle des étudiants*.

4.2. Échantillon observé

Le questionnaire a été passé en séance de TD auprès de 132 étudiants pour lesquels l'enseignement de thermodynamique était terminé :

- 64 étudiants du DEUG A₁ répartis en 3 groupes appartenant à 3 sections différentes (2 h de cours et 2 h de TD hebdomadaires pendant 2 mois et demi) ;

- 68 étudiants de DEUG A₃₂³, répartis en 3 groupes appartenant à une même section (2 h de cours et 2 h de travaux dirigés hebdomadaires pendant 4 mois).

4.3. Résultats

4.3.1. Cycle de Hess et méthode algébrique (partie I du questionnaire)

Dans cette partie nous cherchons à comparer le cycle de Hess (M_1) et la méthode algébrique dans sa décomposition analytique (M_2) ou son bilan algorithmique (M_3). Les questions 1 et 2 cherchent à déterminer quelle est la méthode privilégiée par l'enseignement et la méthode spontanément préférée par les étudiants. Les questions 3 à 7 concernent les lois et principes qui fondent ces méthodes.

Questions 1 et 2

C'est la méthode du cycle de Hess (M_1) qui est globalement la plus apprise par les étudiants (61,3 % des étudiants l'ont vue en cours et TD contre 45 % pour les autres méthodes). On note cependant une nette différence entre A_1 et A_{32} :

– en DEUG A_1 , les étudiants disent avoir appris les 3 méthodes à plus de 60 % et le choix d'utilisation dépend du problème à résoudre ;

– en DEUG A_{32} , seul le cycle de Hess est majoritairement vu par les étudiants en cours et en TD ; pour ceux qui ont appris à appliquer M_1 et M_2 (question 2), la préférence va nettement au cycle de Hess (78 % contre 22 %).

Cette différenciation entre les deux publics nous amène à postuler un net effet de contrat didactique avec des réponses largement induites par les pratiques des enseignants : en DEUG A_1 , les enseignants ne paraissent pas privilégier l'une des méthodes et laissent les étudiants libres de leur choix ; au contraire, en A_{32} , les enseignants utilisent largement le cycle de Hess et préconisent l'application de cette méthode dans les examens.

Question 3

3a : l'énoncé de la loi de Hess est donné correctement par moins de 45 % des étudiants (pour 18,2 % enthalpie = fonction d'état, pour 6,8 % enthalpie de formation = fonction d'état, pour 19,7 % formule algorithmique $\Delta_r H^p = \sum \nu_i \Delta_f H_i^o$) et les réponses restent très approximatives et imprécises.

3b : la question b « Expliquez sur quelle notion physique est fondée cette loi » est laissée sans réponse par 71 % des étudiants. Seuls 15 % évoquent le premier principe, sans différence significative entre A_1 et A_{32} .

3c : la loi de Hess est également à la base de la méthode algébrique pour moins de la moitié des étudiants.

3d : l'extension de la loi de Hess, à d'autres grandeurs thermodynamiques que l'enthalpie, est connue par 72,7 % des étudiants interrogés mais 23,5 % seulement d'entre eux argumentent par la notion de fonction d'état (17,2 % en A₁, 29,4 % en A₃₂). Les grandeurs thermodynamiques citées sont d'abord l'entropie S (56 %), l'enthalpie libre G (27,3 %) et enfin l'énergie interne U (19,7 %) qui, bien que servant à énoncer le premier principe, est loin d'être sur un pied d'égalité avec H .

Question 4

Cette question relative aux enthalpies de réaction embarasse les étudiants (près de 50 % de non-réponses tant pour 4a que pour 4b) et cet embarras semble se situer entre la mesure expérimentale directe de ces enthalpies et leur détermination par le calcul. À propos de la « mesure » des enthalpies de réaction (4a), 3/4 des réponses exprimées évoquent les mesures expérimentales, en particulier calorimétriques. Cependant la question 4b (« les besoins des chimistes ») montre que peu d'étudiants (26 %) réalisent que le recours au calcul ne devient indispensable que lorsque les mesures expérimentales sont impossibles ou difficiles. Pour la majorité de ceux qui répondent, les méthodes de calcul permettent en effet de préciser, compléter, vérifier ou prévoir les résultats expérimentaux. Le rôle attribué à la théorie semble ainsi surpasser celui attribué à l'expérimental.

Parmi ceux qui donnent à ces calculs un rôle de prévision certains pensent que « ces méthodes permettent de prévoir si des réactions sont possibles ou non, de prévoir le sens d'évolution de la réaction » sans conscience des limites du premier principe qui, à l'inverse du second principe, ne permet pas une telle prévision (cf. la controverse Berthelot-Duhem à la fin du 19^{ème} siècle).

Question 5

Les étudiants sont d'accord pour associer la notion d'enthalpie à une grandeur physique mesurable, avec cependant 40 % de non-réponses. Ces grandeurs sont l'énergie et la chaleur (15,6 + 18,7 pour A₁ ; 1,4 + 29,4 pour A₃₂) mais la température est également beaucoup mentionnée.

Question 6

La propriété caractéristique d'une fonction d'état (ne dépendre que de l'état initial et de l'état final) est énoncée par 60 % des étudiants.

Question 7

« On peut déterminer la chaleur échangée au cours d'une réaction chimique en utilisant la propriété d'état » ne conduit à une réponse correcte (détermination de $\Delta_r H$ ou $\Delta_r U$) que pour 10,6 % des étudiants et plus des

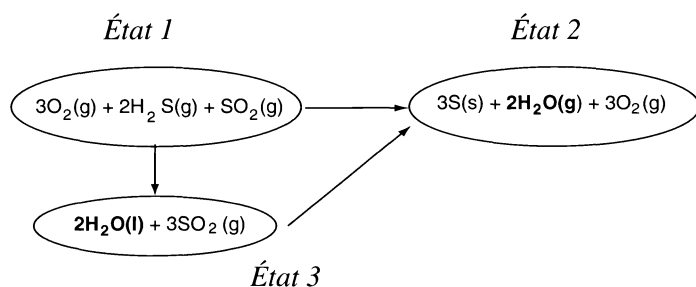
2/3 ne répondent pas. La chaleur et quelquefois la température sont énoncées comme fonctions d'état.

En conclusion de cette première partie du questionnaire, près de 45 % des étudiants énoncent la loi de Hess sous ses diverses formulations mais ils ne sont que 15,5 % à lui donner le premier principe comme fondement et 10 % à établir une relation avec la notion de fonction d'état qu'ils savent pourtant caractériser.

4.3.2. Résolution d'un exercice par le cycle de Hess (partie II du questionnaire)

• Méthode d'analyse

Nous avons délibérément choisi, dans cette détermination de



l'enthalpie de formation de SO_2 à 298 K, de ne pas demander d'application numérique pour éviter que les problèmes de calcul n'interfèrent avec ceux de thermochimie.

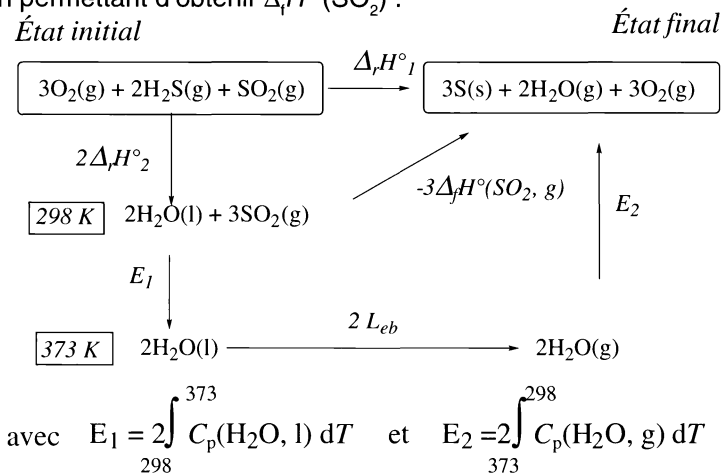
Pour obliger au choix du cycle de Hess comme méthode de résolution et limiter la difficulté nous avons proposé de compléter le cycle ci-dessous. Ce cycle déjà partiellement structuré est inachevé puisque H_2O y figure sous deux états physiques différents et qu'il convient d'assurer le passage d'un état à l'autre :

L'analyse *a priori* amenait à 4 stratégies prévisibles :

- S_1 , stratégie optimale intégrant correctement le changement d'état ;
- S_2 , stratégie ignorant le changement d'état à 298 K ;
- S_3 , stratégie avec changement d'état à 298 K ;
- S_4 , stratégie avec changement d'état ne prenant en compte que le changement de température.

La *stratégie S₁* implique diverses étapes de résolution (l'ordre peut en être éventuellement modifié). Il s'agit d'amener l'eau à sa température de changement d'état, d'opérer le changement d'état et de ramener l'eau à la température initiale de 298 K. Le problème est assez bien circonscrit puisque pour boucler le cycle, déjà largement ébauché, il suffit de travailler sur l'eau dont les deux états physiques différents apparaissent clairement dans l'ébauche fournie, même s'ils ne font pas l'objet d'un questionnement direct. On peut, si on explicite tout, repérer 14 étapes.

- 1 – Trouver l'équation-bilan correspondant à $\Delta_r H$ demandé :
[il s'agit de $S(s) + O_2(g) \rightarrow SO_2(g)$].
- 2 – Repérer les équations-bilans, données dans l'énoncé et les placer sur le cycle.
- 3 – Appliquer le coefficient 2 à l'équation (2) pour passer de l'état 1 à l'état 3.
- 4 – Retrouver la réaction de formation de SO_2 , présentée de façon inverse dans le cycle, avec coefficient 3.
- 5 – Faire le passage de $H_2O(l)$ à $H_2O(g)$ entre les états 3 et 2.
- 6 – « Élever » H_2O à 373 K.
- 7 – Faire passer l'eau de l'état liquide à l'état gazeux à 373 K avec la chaleur latente adéquate.
- 8 – Faire « redescendre » H_2O à 298 K.
- 9 – Ne pas oublier le coefficient multiplicatif 2 dans les 3 étapes précédentes.
- 10 – Différencier les C_p de $H_2O(l)$ et $H_2O(g)$.
- 11 – Donner les bornes exactes des intégrales.
- 12 – Choisir un état initial (EI) et un état final (EF) pour écrire la relation permettant d'obtenir $\Delta_r H^\circ(SO_2)$:



13 – Écrire que la variation d'enthalpie entre état initial et état final est la même :

$$\Delta_r H^\circ_1 = 2\Delta_r H^\circ_2 + E_1 + 2L_{\text{eb}} + E_2 - 3\Delta_f H^\circ(\text{SO}_2, \text{g})$$

14 – En tirer mathématiquement $\Delta_r H^\circ(\text{SO}_2, \text{g})$.

Les autres stratégies négligent chaque fois une ou plusieurs étapes :

- la *stratégie* S_2 oublie les étapes 5 à 11 ;
- la *stratégie* S_3 oublie les étapes 6, 8, 10, 11 et envisage l'étape 7 à 298 K ;
- la *stratégie* S_4 oublie l'étape 7.

L'étude des réponses nous a amenés à observer une cinquième stratégie S_5 que nous n'avions pas prévue dans l'analyse *a priori* : S_5 est identique à S_3 , avec changement d'état à 298 K mais avec $T_{\text{vap}}(\text{H}_2\text{O})$, pris à la place de la chaleur latente, comme variation d'enthalpie (confusion entre chaleur et température).

• Conclusions

Les cinq stratégies identifiées sont inégalement utilisées :

- S_1 est utilisée par 12,5 % des étudiants de A_1 et 42,6 % des étudiants de A_{32} (au total 28 % des étudiants) ; cette stratégie en 14 étapes conduit au bon résultat mais sa relative complexité peut expliquer qu'elle soit mobilisée par moins d'un tiers des étudiants ; elle se situe cependant en tête des 5 stratégies ;

- S_2 rassemble globalement 16,7 % des étudiants qui choisissent d'ignorer purement et simplement le changement d'état de l'eau ;

- S_3 regroupe 25 % des étudiants de chacune des deux filières ;

- S_4 n'est appliquée que marginalement (3 %) ;

- S_5 , qui montre une confusion importante entre température et chaleur, est utilisée par 11 % des étudiants en A_1 et 1,5 % des étudiants en DEUG A_{32} .

L'application d'une des 5 stratégies s'accompagne aussi de 3 types d'erreurs :

- utilisation d'un seul C_p pour $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ et $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ dans les stratégies S_1 et S_4 (13 % des étudiants, erreur trois fois plus fréquente en A_{32} qu'en A_1) ;

- erreurs de coefficients multiplicatifs des enthalpies (plus de 30 % des étudiants) ;

– erreurs dans le signe des enthalpies (17,5 %, deux fois plus fréquente en A_{32}).

Au travers de ces résultats on voit que le changement d'état n'est pas maîtrisé par les étudiants (sauf les 28 % qui utilisent S_1) et que la filière A_{32} réussit mieux que la filière A_1 dans la stratégie de résolution malgré des erreurs numériques et de signes plus importantes. L'identification de l'état initial et de l'état final et son utilisation dans le calcul ne sont faites que par une minorité (13,5 %), trois fois plus élevée en A_{32} (18,3 %) qu'en A_1 (6,8 %).

• Contrat didactique classique et contrat nouveau

Dans la gestion des données, le contrat didactique implicite est le suivant : l'enseignant doit fournir à l'élève toutes les données nécessaires à la résolution et l'élève doit utiliser, dans la résolution, toutes ces données. Reprenons une citation de Chevallard : « *Un problème proposable possède une réponse et une seule ; pour parvenir à cette réponse toutes les données proposées doivent être utilisées, aucune autre indication n'est nécessaire* ». (Chevallard, cité par Joshua et Dupin, 1993, p. 267).

Notre expérimentation, comme un certain nombre de sujets d'examen ne respecte pas ce contrat classique : bien qu'il ne s'agisse pas ici, dans la deuxième partie du questionnaire, d'un exercice numérique, toutes les données physiques nécessaires ne sont pas fournies. Les indications écrites « *l'initiative vous est laissée d'utiliser des données supplémentaires* » ou orales « *n'hésitez pas à travailler avec des données en plus si vous en avez besoin* » vont dans le sens d'un contrat didactique nouveau dans lequel l'étudiant aurait la responsabilité de gérer les données dont il a besoin.

Dans la stratégie S_1 , utilisée globalement dans 28 % des réponses, les étudiants se situent dans cette évolution du contrat didactique, davantage d'ailleurs en A_{32} (près d'un étudiant sur deux) qu'en A_1 (à peine plus d'un étudiant sur 10). Cette différence notable peut s'expliquer par le fait que les étudiants du DEUG A_{32} sont en deuxième année universitaire. On peut penser que moins dépendants du contrat didactique classique, ils sont capables d'une certaine autonomie.

La stratégie S_5 renvoie les étudiants au contrat didactique classique : toutes les données de l'énoncé sont exploitées sans modification, même au prix de la confusion entre température et chaleur de changement d'état. Cette stratégie se retrouve à nouveau davantage en A_1 (10,9 %) qu'en A_{32} (1,5 %).

Notons cependant que les meilleurs résultats des étudiants de A_{32} ne prouvent pas que le cycle de Hess, qu'ils ont davantage utilisé dans le temps didactique, soit plus formateur puisqu'on a vu, dans la première partie,

et on verra, dans la troisième partie, que leurs résultats d'ensemble ne sont pas particulièrement meilleurs. L'émergence d'un contrat didactique nouveau, apte à développer l'autonomie et à libérer l'étudiant de première année des procédures algorithmiques, constitue à notre sens un enjeu didactique important. Nos résultats ne nous ont cependant pas permis de mettre réellement en évidence une telle émergence même s'ils entendaient se situer dans une telle perspective.

4.3.3. Maîtrise conceptuelle (partie III du questionnaire)

Cette partie du questionnaire utilise la technique du Q-sort où, à propos de 12 propositions (Q_1 - Q_{12}), les étudiants doivent choisir le degré de certitude de leurs réponses entre 4 possibilités : - 2, -1, +1, +2 qui correspondent respectivement à « pas du tout d'accord », « plutôt pas d'accord », « plutôt d'accord » et « tout à fait d'accord ». Les moyennes de certitude ont toutes tendance à aller dans le sens de « la bonne réponse », même si c'est quelquefois d'extrême justesse (Q_7).

L'analyse des réponses peut se faire selon quatre types de regroupements.

• Conception d'énergie, chaleur et enthalpie (items 1, 2, 4, 7, et 12)

Si la chaleur est bien reconnue comme une forme d'énergie (Q_2 représente le meilleur score de bonnes réponses avec 1,63 comme moyenne de certitude et 82 % d'accord), les étudiants sont plus hésitants sur la relation entre chaleur et enthalpie ($Q_{12} = 0,59$) ou chaleur latente et enthalpie ($Q_1 = 0,61$).

La réponse Q_7 , de loin la plus mauvaise de ce lot, montre que les étudiants n'établissent pas majoritairement de correspondance entre « chaleur latente » et « chaleur », moins encore qu'entre « chaleur latente » et « enthalpie ». Ceci vaut plus encore pour A_{32} ($Q_7 = -0,12$ avec 39 % d'accord) que pour A_1 ($Q_7 = -0,06$ avec 39 % d'accord).

La partie II a pourtant montré que pour la section A_{32} la chaleur latente était appliquée de façon relativement correcte dans les problèmes ($S_1 + S_3 = 67\%$) ce qui peut confirmer que les processus d'algorithmisation, mobilisés dans les résolutions de problèmes, n'impliquent pas compréhension globale du phénomène.

• Énergie interne (items 5 et 9)

La réponse Q_5 montre que les étudiants ont beaucoup de mal à situer l'énergie interne U , à côté de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle et cela plus encore en A_{32} (indice de certitude 0,27) qu'en A_1 (0,47). L'énergie interne semble être une fonction thermodynamique, sans

statut particulier, qui ne dispose que d'un rôle formel et mathématique. L'item 9 « *le cycle de Hess peut s'appliquer à la détermination de $\Delta_r U^\circ$* » est assez massivement accepté avec cependant 12 % de désaccord (aussi bien en A₁ qu'en A₃₂). Cela confirme que les grandeurs thermodynamiques citées par les étudiants, dans la question I 3d, l'étaient davantage pour leur relation avec l'enthalpie que pour leur nature de fonction d'état.

• **Relation avec les calculs de variation d'enthalpie (items 8, 10 et 11)**

Ces items malgré d'assez bons résultats montrent un certain niveau de confusion entre enthalpie de formation et enthalpie de réaction (Q₈, Q₁₀), particulièrement en A₁ (environ 30 % de réponses fausses). Le signe de l'enthalpie, associé à un sens précis de réaction, est plus largement maîtrisé (Q₁₁ = 1,45 avec 10 % seulement de réponses fausses). Il est vrai que le côté automatique de cette question la rend plus facile.

• **Relation avec la réalité expérimentale (items 3 et 6)**

Les étudiants ont assimilé, à propos de Q₃ et plus encore de Q₆, que, dans l'application des méthodes de détermination indirecte, la réalité intervient peu et qu'il s'agit avant tout d'accéder à des données déterminées par des calculs sur des réactions fictives.

En conclusion de cette troisième partie, on peut observer, sur la figure 1, que les étudiants éprouvent des difficultés à coupler les différentes notions fondamentales de thermochimie et thermodynamique (énergie interne, variation d'enthalpie et relation avec la chaleur, chaleur latente, fonction d'état, etc.) mais qu'ils sont capables d'éviter les pièges de calcul des variations d'enthalpie (items 8, 10 et 11), ce qui atteste d'une relative maîtrise dans l'application d'algorithmes même si le sens physique des concepts n'est pas acquis.

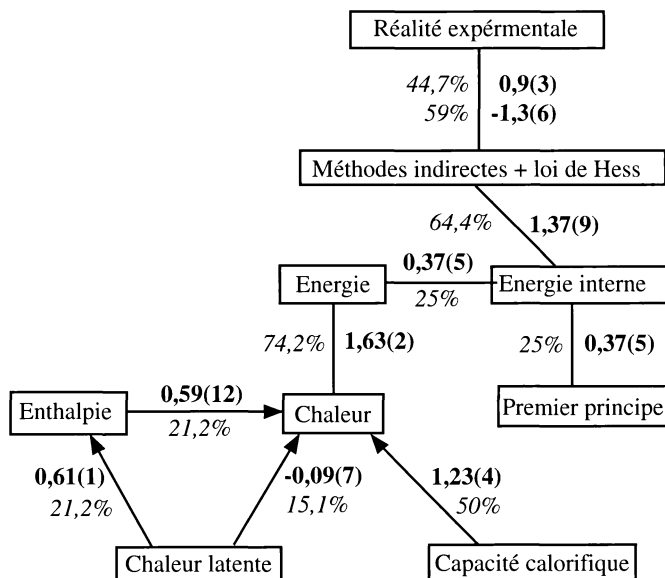


Figure 1 : La mise en relation de quelques concepts de la thermodynamique

- en italique, le pourcentage d'étudiants ayant fait le lien entre les 2 notions indiquées ;
- les moyennes de certitude attribuées à la réponse ;
- entre parenthèses, le numéro de la question où les notions sont impliquées

5. CONCLUSIONS ET PROPOSITIONS DIDACTIQUES

5.1. Retour sur les hypothèses de recherche

L'ensemble du travail d'analyse mené nous permet de revenir sur les trois hypothèses de recherches formulées plus haut (cf. 2.3.)

5.1.1. Hypothèse 1

L'analyse des programmes de première S et de DEUG 1ère année jointe à l'analyse des manuels universitaires semble bien indiquer que sont privilégiés les savoir-faire et les calculs plutôt que la compréhension conceptuelle. Le texte du savoir reste largement centré sur les méthodes

automatiques et les algorithmes de calcul. Notre hypothèse 1 paraît donc, ici, globalement vérifiée.

L'analyse des réponses au questionnaire proposé aux enseignants montre que ceux-ci ne revendiquent pas, pour la plupart, une logique purement calculatoire et apprécient l'intérêt didactique d'une présentation diversifiée intégrant largement le cycle de Hess. Ils en précisent cependant les difficultés de mise en oeuvre et les limites face aux contraintes d'enseignement et au temps didactique insuffisant. Il ne paraît donc pas possible, sur ce plan du savoir enseigné, de valider ou d'invalidier notre hypothèse 1.

Cependant, le poids conjugué de l'évaluation, du contrat didactique et du texte du savoir semble bien laisser à la charge de l'étudiant la compréhension globale des concepts comme le montrent les déficits observés dans les réponses à la troisième partie du questionnaire posé aux étudiants.

5.1.2. Hypothèse 2

L'hypothèse 2 « *les étudiants ne relient pas entre elles les différentes notions enseignées en thermochimie...* » se situe logiquement, côté étudiant, dans la suite de l'hypothèse 1. On peut la subdiviser en trois sous-hypothèses, toutes vérifiées par le travail d'analyse mené à partir du questionnaire posé aux étudiants :

– « *la loi de Hess, qui fonde les méthodes de détermination indirecte des chaleurs de réaction, n'est pas connue en tant que telle* » comme le montre les réponses à la question I 3a ;

– « *les étudiants ne savent pas que le premier principe de la thermodynamique est à la base des calculs faits en thermochimie, à partir des méthodes indirectes* » puisque 15 % seulement répondent, dans la question I 3b, que le premier principe fonde la loi de Hess ;

– « *la notion de fonction d'état est connue des étudiants (cf. I.6.) mais elle n'est pas opérationnelle en chimie* » car son application est très peu utilisée (18 % citent « *H fonction d'état* » comme loi de Hess, 23,5 % l'appliquent en I 3d, 10 % savent relier cette notion à la chaleur de réaction.)

5.1.3. Hypothèse 3

À partir de l'exercice sur le cycle de Hess (partie II du questionnaire), de quelques items de la partie III et de l'analyse de copies d'examen nous avons pu vérifier l'hypothèse 3 : « *les étudiants savent résoudre un exercice impliquant les méthodes de détermination indirecte des chaleurs de réaction,*

c'est-à-dire des algorithmes, mais face à un exercice « innovant » ils ne savent pas adapter ces algorithmes ».

La plupart des étudiants réussit à résoudre les exercices proposés qui consistent en une simple application des algorithmes. De même, les items 8, 10 et 11 de la partie III obtiennent des taux de bonnes réponses relativement importants.

En revanche, l'exercice sur le cycle de Hess, qui nécessitait une démarche plus innovante, a donné des résultats plus faibles, particulièrement en A_1 où seuls 12,5 % des étudiants ont répondu correctement (stratégie S_1). Un tel résultat traduit, à propos de la loi de Hess, un décalage entre stratégie de résolution et apprentissage conceptuel des apprenants en première année d'Université. Ce décalage a également été observé à partir de l'analyse que nous avons menée de copies d'examen en thermochimie en DEUG A_1 en 1992-1993 et 1993-1994 : les résultats sont corrects tant qu'il s'agit d'applications directes de formules algorithmiques mais s'effondrent pour des résolutions plus complexes ou encore des questions qualitatives mettant en œuvre le sens des concepts. L'importance d'un tel décalage a déjà été noté à propos de la stœchiométrie (Niaz, 1989).

On peut donc conclure de ce travail d'analyse que les étudiants contraints de prendre en charge la compréhension globale des phénomènes ne parviennent pas à **lier entre eux les différents concepts** et se réfugient dans des **procédures algorithmiques**. Cette place importante des algorithmes, efficaces comme on l'a vu dans la résolution d'exercices peu innovants, est cohérente avec un mode d'évaluation visant l'apprentissage de procédures de calcul et de savoir-faire immédiatement opératoires plutôt que l'articulation entre concepts (faiblesse du temps didactique et du taux d'encadrement, hétérogénéité croissante des étudiants, diversité des filières, modularisation, etc.)

5.2. Propositions didactiques

Devant ce constat, il serait illusoire de livrer un panel de propositions didactiques susceptibles de transformer fondamentalement la situation. Notre pratique de l'enseignement en premier cycle et la régularité d'observations convergentes avec les conclusions de ce travail nous amènent simplement à proposer quelques axes de réflexion.

5.2.1. Mise en oeuvre d'une dialectique outil-objet

La dialectique outil-objet est définie en didactique des mathématiques comme « *un processus cyclique organisant les rôles*

respectifs de l'enseignant et des élèves, au cours duquel les concepts mathématiques jouent alternativement le rôle d'outil pour résoudre un problème et d'objet prenant place dans la construction d'un savoir organisé » (Douady, 1986, p. 6). Un apprenant a des connaissances « s'il est capable d'en provoquer le fonctionnement comme outils explicites dans des problèmes qu'il doit résoudre » (Douady, 1986, p. 11).

Nous pouvons reprendre à notre compte cette dialectique outil-objet, créatrice de sens, pour l'apprentissage des concepts thermodynamiques. Trop souvent, en effet, on met en avant la fonction d'état et le premier principe comme objets d'étude donnant lieu à des développements conceptuels et à des approfondissements théoriques et on limite la chaleur latente ou la capacité calorifique à de simples outils, simples auxiliaires nécessaires à la résolution algorithmique d'exercices. C'est bien ce qu'on a observé avec le questionnaire posé aux étudiants. Cette dichotomie fait que certains objets d'étude sont connus en tant que tels mais ne sont pas opératoires comme outils de résolution (la notion de fonction d'état par exemple) tandis que certains outils sont dépourvus de signification théorique (la notion de chaleur latente par exemple). Tout au contraire, il s'agirait ici de prendre ces deux types de concepts à la fois comme outils pour résoudre un problème et comme objets ayant obligatoirement leur place dans la construction du savoir. On pourrait ainsi dépasser l'algorithme et accéder au sens.

5.2.2. Intérêt du cycle de Hess

Par sa schématisation le cycle de Hess permet la mise en valeur du premier principe et de la notion de fonction d'état. On sait que le schéma, par son rôle dans la représentation imagée de l'information transmise, peut fonctionner comme médiateur entre la formulation abstraite et la représentation mentale d'un concept. Cette médiation, jointe à la dialectique outil-objet précédente, pourrait donner à la méthode du cycle de Hess un réel intérêt didactique, pour la construction des connaissances des étudiants.

5.2.3. Utilisation des algorithmes

Il ne s'agit pas d'évacuer l'aspect opératoire et fonctionnel des algorithmes mais de les replacer pleinement dans leur contexte conceptuel et d'indiquer comment et pourquoi l'algorithme fonctionne (Schrader, 1987). Appliquée au cycle de Hess une pareille utilisation permettrait de donner plus d'importance à la compréhension qu'à la mémorisation de règles (Suntcliffe, 1983). Elle autoriserait la mise en cause d'une algorithmisation-refuge purement automatique dont nous avons pu vérifier la consistance à travers le questionnaire posé aux étudiants.

5.2.4. Double évaluation quantitative et qualitative

Sortir d'une algorithmisation-refuge de type répétitif, largement induite par l'évaluation quantitative qui prévaut le plus souvent en première année d'Université, est bien un véritable enjeu didactique. À côté de l'évaluation classique, fondée le plus souvent sur d'inévitables exercices calculatoires ou d'authentiques résolutions de problèmes, il serait utile d'introduire un quota de questions qualitatives sur le sens des concepts et des phénomènes. Ceci est en accord avec des propositions de même nature faites pour l'étude de la stœchiométrie ou des lois des gaz à l'arrivée à l'Université (Sawrey, 1990).

Cette évaluation qualitative, relative à des questions de compréhension et de réflexion, surprend toujours les étudiants lorsqu'elle est mise en oeuvre pour la première fois mais elle est de nature à permettre une modification du contrat didactique, à remettre en cause la logique algorithmique automatique et à favoriser une véritable maîtrise et mise en relation des différents concepts à mobiliser.

Ces différentes propositions nous paraissent utilisables dans le cadre d'un enseignement de thermochimie en premier cycle universitaire. Leur caractère opératoire et leur facilité de mise en oeuvre dépendent évidemment du contexte et des contraintes d'enseignement mais jointes à d'autres propositions, fondées sur d'autres études, elles pourraient favoriser un **apprentissage-appropriation** dans un secteur où les progrès à accomplir sont à la mesure des lacunes et carences constatées.

NOTES

1. Le Diplôme d'Études Universitaires Générales (DEUG) comportait à Grenoble, au moment de notre étude, deux sections : le DEUG A (sciences de la matière) et le DEUG B (sciences de la vie). Notre expérimentation a été menée sur des sections et des copies du DEUG A, même si notre analyse est largement transposable au DEUG B.

2. La première année de DEUG A est constituée par le DEUG A₁ et la deuxième année par le DEUG A₂.

3. Le DEUG A₃₂ appartenait à une filière spécifique à Grenoble qui permettait aux étudiants volontaires d'accomplir un DEUG en 3 ans, à vitesse ralentie, qui a fonctionné de la rentrée 1989 à la rentrée 1997 : le programme de la première année du DEUG A était effectuée en 2 ans (DEUG A₃₁ puis DEUG A₃₂ où était traitée la thermochimie) ; les étudiants accomplissaient ensuite leur troisième année en deuxième année normale du DEUG dans la filière commune du DEUG A₂.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDER P. & SONNESSA A.J. (1965). *Principes of chemistry*. New-York, Mac Millan Company.
- ANDERSON B. (1990). Pupils conceptions of matter and its Transformations. *Studies in science Education*, n° 18, pp. 53-85.
- ARNAUD P. (1988). *Cours de chimie physique*. Paris, Dunod.
- ATKINS P. (1992). *Chimie générale*. Paris, Interéditions.
- BALESDENT D. (1985). De l'intérêt de la thermodynamique énergétique pour la compréhension du 2^{ème} principe. In ReCoDic (Éd.), *L'enseignement de la thermodynamique, Les recherches en didactique de la chimie*, vol. Vb. Poitiers, CUDNME de Poitiers, p. 9.
- BARROW G.M. (1961, 1976). *Chimie physique, tome 1*. Paris, Masson.
- BARROW G.M. (1988). Thermodynamics should be built on energy, not on heat and work. *Journal of chemical Education* vol. 65, n° 2, pp. 122-125.
- BATTINO R. (1979). Why thermodynamics should not be taught to freshmen or who owns the problem. *Journal of chemical Education*, vol. 56, n° 8, pp. 520-522.
- BEAUFILS D., LETOUZE J.-C., RICHOUX H. & RICHOUX B. (1996). Des images pour des activités scientifiques. *Aster*, n° 22, pp. 149-168.
- BERTRAND G. (1988). L'enseignement de la thermodynamique a-t-il trouvé son équilibre ? *L'Actualité Chimique*, n° 1, pp. 11-17.
- BESSOT A. & LE THI HOAI A. (1994). Une étude du contrat didactique à propos de la racine carrée. *Petit x*, n° 36, pp.39-60.
- BLANDAMER M.J. & BURGESS J. (1987). Thermodynamics properties, a chartist approach. *Education in Chemistry*, vol. 24, n° 3, pp. 85-87.
- BROUSSEAU G. (1986). Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Recherches en Didactique des mathématiques*, vol. 7, n° 2, pp. 33-115.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1988). *Supplément au numéro 21 du 2 juin 1988*. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1992). *Numéro hors série du 24 septembre 1992*. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale.
- BUTLER J.A.U. (1928, 1949). *Chemical thermodynamics*. London, Mac Millan.
- DOUADY R. (1986). Jeux de cadres et dialectique outil-objet. *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 7, n° 2, pp. 5-31.
- FABRITIUS E. (1990). *La réaction chimique, tome 1, thermodynamique chimique*. Paris, Masson.
- GALLAIS F. (1950, 1957). *Chimie minérale théorique et expérimentale*. Paris, Masson.
- GOFFARD M. (1993). Réflexions post-bac. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 759, pp. 1593-1604.
- HUNTZ M. & MEYER C. (1988). *Thermochimie*. Paris, Ellipses.
- JOSHUA S. & DUPIN J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris, PUF.
- LAFFITTE M. & ROUQUÉROL F. (1990). *La réaction chimique, tome 1*. Paris, Masson.
- LAUGIERA. & DUMON A. (1994). Les obstacles à la conceptualisation de la réaction chimique en classe de seconde, interprétation microscopique modèle-langage. In M. Caillot (Coord.), *Actes du quatrième séminaire national de la recherche en didactique des sciences physiques*. Amiens, Université de Picardie Jules Verne (CURSEP) et IUFM de Picardie, pp. 37-48.

- LESOULT G. (1985). Où la micro-informatique et la télématique pourraient contribuer à rendre attractif l'enseignement de la thermodynamique auprès des élèves ingénieurs. In ReCoDic (Éd.), *L'enseignement de la thermodynamique, Les recherches en didactique de la chimie, vol. Vb*. Poitiers, CUDNME de Poitiers, p. 11.
- MAHAN B.-H. (1969). *Thermodynamique chimique*. Paris, Édisciences.
- MASTROT G. (1995). *Enseignement et apprentissage de la thermochimie en DEUG A 1ère année : l'algorithmisation, une difficulté à l'application des fondements de la thermodynamique*. Mémoire de DEA, Université Joseph Fourier, Grenoble 1.
- MC QUARRIE D. & ROCK P.A. (1992). *Chimie générale*. Bruxelles, De Boeck.
- MOTTET G. (1996). Les situations-images. *Aster*, n° 22, pp. 15-56.
- NAZ M. (1989). The Relationship between M-Demand, Algorithms, and Problem Solving : A Neo-Piagetian Analysis. *Journal of Chemical Education*, vol. 66, n° 5, pp. 422-424.
- ONILLON M. (1985). L'enseignement de la thermodynamique : situation, difficultés, remèdes possibles. In ReCoDic (Éd.), *L'enseignement de la thermodynamique, Les recherches en didactique de la chimie, vol. Vb*. Poitiers, CUDNME de Poitiers, p. 6.
- PICKERING M. (1990). Further studies on concept learning versus problem solving. Is there a difference ? *Journal of chemical Education*, vol. 64, n° 6, pp. 508-510.
- RIST A. (1985). Pour une meilleure perception des fonctions thermodynamiques par les étudiants. In ReCoDic (Éd.), *L'enseignement de la thermodynamique, Les recherches en didactique de la chimie, vol. Vb*. Poitiers, CUDNME de Poitiers, p. 14.
- SANFELD A. (1988). Sur une présentation conceptuelle erronée de la thermodynamique chimique. *L'Actualité Chimique*, n° 3, pp. 124-129.
- SAWREY B.A. (1990). Concept learning versus problem solving : revisited. *Journal of Chemical Education*, vol. 67, n° 3, pp. 253-254.
- SCHRADER C.L. (1987). Using algorithms to teach problem solving. *Journal of Chemical Education*, vol. 64, n° 6, pp. 518-519.
- SCHWOB M. & BLONDEL F.-M. (1996). Questions posées par la conception et la réalisation d'un environnement d'aide à la résolution de problèmes en chimie. *Didaskalia*, n° 8, pp. 111-137.
- SOLOMONIDOU C. & STAVRIDOU H. (1994). Les transformations des substances, enjeu de l'enseignement de la réaction chimique. *Aster*, n° 18, pp. 75-95.
- SUARD M., PRAUD B. & PRAUD L. (1971). *Éléments de chimie générale*. Paris, Flammarion.
- SUTCLIFFE R. (1983). Another method for solving problems based on Hess's law. *Journal of chemical Education*, vol. 60, n° 4, pp. 362-364.
- TRIPP T.B. (1976). The definition of heat. *Journal of chemical Education*, vol. 5, n° 12, pp. 782-784.
- TUECH J., DUBUSC M. & MOSSOYAN M. (1995). *Thermodynamique chimique*. Paris, Colin.
- UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER (1986). *DEUG A expérimental. Enseignement de chimie. Objectifs de l'enseignement de première année*. Grenoble, Université Joseph Fourier.

- 3 – Si vous enseignez les *méthodes précédentes 1 et 2*
- a– Montrez-vous l'équivalence de ces méthodes ?
 Oui Non
- b– Comparez-vous ces deux méthodes ?
 Oui Non
- c– Pourquoi ?
- d– Avez-vous constaté que les étudiants préfèrent l'une des deux méthodes ?
 Oui Non
Laquelle ? Méthode 1 Méthode 2
À votre avis pourquoi ?
- e– Dans un sujet d'examen, préférez-vous
 Laisser le choix de la méthode aux étudiants
 Imposer une méthode
Dans ce dernier cas quelle méthode a votre préférence ?
- 4 – Expliquez-vous que c'est le **1^{er} principe** qui fonde ces méthodes ?
 Oui Non
- 5 – a– Voyez-vous un **intérêt didactique** à l'utilisation du cycle de Hess plutôt qu'à la méthode algébrique ?
 Oui Non
- b– Si *oui* pour quelle(s) raison(s) ?
Cochez une ou plusieurs propositions parmi celles qui suivent
 Visualisation concrète plutôt qu'abstraction
 Plus généralisable
 Meilleure compréhension physique
 Limite les automatismes de raisonnement et sollicite l'imagination
 Autres :
- c– Quelles difficultés voyez-vous à l'utilisation du cycle de Hess par les étudiants ?
- 6 – Que vous ayez introduit ou non l'application du cycle de Hess pour la détermination indirecte des chaleurs de réaction, utilisez-vous le cycle pour d'autres notions du cours ?

- Calcul des énergies de liaisons (covalence)
- Calcul d'énergies réticulaires (cycle de Born-Haber)
- Calcul de $\Delta_r H^\circ$ avec changement de température
- Autres

Précisez :

7 – Observations personnelles

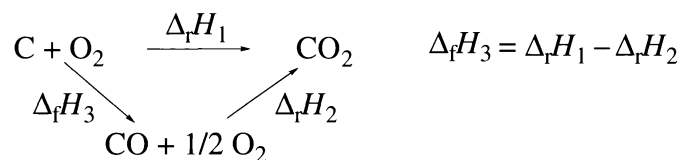
ANNEXE 2

ENQUÊTE PROPOSÉE AUX ÉTUDIANTS

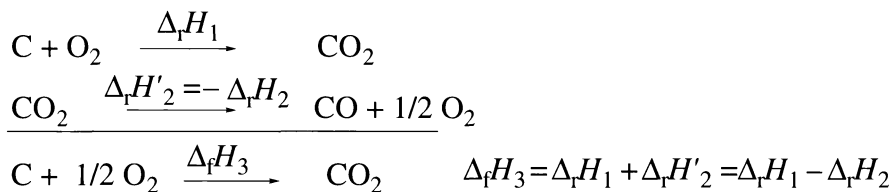
Exemple d'utilisation des méthodes auxquelles le questionnaire fait référence :

On cherche l'enthalpie de formation de CO, c'est à dire $\Delta_f H_3$

Méthode 1 : Cycle de Hess



Méthode 2 : Combinaison algébrique d'équations de réaction



Partie I

Cochez les cases selon votre choix de réponse

1 – a – Quelle(s) méthode(s) de calcul des chaleurs de réactions avez-vous apprise(s) dans votre enseignement de chimie ?

- Méthode 1 : Le cycle de Hess en cours en TD
- Méthode 2 : La combinaison algébrique d'équations en cours en TD
- Méthode 3 : $\Delta_f H^\circ = \sum \nu_i \Delta_f H_i^\circ$ en cours en TD

2 – Si vous avez appris à appliquer les méthodes 1 et 2

a – Laquelle préférez-vous utiliser dans un exercice ? Méthode 1 Méthode 2

b – Utilisez-vous toujours la même méthode quel que soit le problème à résoudre ?

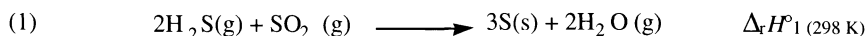
- Oui Non

- Si *oui* laquelle ? Méthode 1 Méthode 2
- Pourquoi ?
- c– Si vous *comparez* ces deux méthodes laquelle vous semble
- La plus facile Méthode 1 Méthode 2
 - La plus rapide Méthode 1 Méthode 2
 - La plus automatique Méthode 1 Méthode 2
- 3 – a– Énoncez *la loi générale* – Loi de Hess – qui permet de calculer les chaleurs de réaction par l'intermédiaire d'un cycle de Hess, en vous aidant de l'exemple de l'enthalpie de formation de CO (page précédente) :
- b– Expliquez sur quelle notion physique est fondée cette loi :
- c– Est-ce que cette loi est aussi à la base de la méthode algébrique ?
Pourquoi ?
- d– On applique généralement cette loi à l'enthalpie. À votre avis, peut-on appliquer cette loi à d'autres grandeurs thermodynamiques ? Si *oui* auxquelles ? Pourquoi ?
- 4 – a– Comment les chimistes mesurent-ils les enthalpies de réaction ?
- b– À votre avis, pourquoi les chimistes ont-ils besoin des méthodes de calcul citées dans la question 1 ?
- 5 – Peut-on associer la variation d'*enthalpie* à une grandeur physique mesurable ? Si *oui* laquelle ?
- 6 – Énoncer une *propriété* caractéristique d'une fonction d'état :
- 7 – On peut déterminer théoriquement la chaleur échangée au cours d'une réaction chimique en utilisant la propriété d'une fonction d'état. Expliquer :

Partie II

On voudrait calculer l'enthalpie standard de **formation de SO₂** à 298 K.

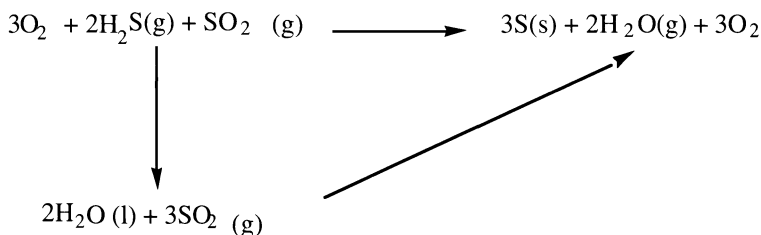
Sachant qu'à 298 K on a :



et que $T_{\text{vap}}(\text{H}_2\text{O}(\text{l})) = 373\text{ K}$.

L'initiative vous est laissée d'utiliser des données supplémentaires.

Voici une *partie* du cycle de Hess qui permet ce calcul :



- Compléter le cycle
- Noter sur le schéma du cycle les $\Delta_r H^\circ$
- Préciser l'état initial et l'état final choisis
- Ecrire la relation qui permet d'obtenir $\Delta_r H^\circ_{(\text{SO}_2)}$

Partie III

Dans cette partie nous vous demandons d'entourer le nombre correspondant à votre réponse selon cette notation :

- 2 = pas du tout d'accord
- 1 = plutôt pas d'accord
- 1 = plutôt d'accord
- 2 = tout à fait d'accord

- 1 – La chaleur latente correspond à une variation d'enthalpie.....

-2	-1	1	2
----	----	---	---
- 2 – La chaleur est une forme courante de transfert de l'énergie.....

-2	-1	1	2
----	----	---	---
- 3 – À une température de 298 K et une pression totale de 1 atm.....

-2	-1	1	2
----	----	---	---

H₂O gaz est un état physique hypothétique.
- 4 – Le produit de la capacité calorifique molaire par la.....

-2	-1	1	2
----	----	---	---

variation de température représente physiquement une quantité de chaleur molaire.
- 5 – On peut dire que l'énergie totale d'un système est égale.....

-2	-1	1	2
----	----	---	---

à la somme de l'énergie cinétique, de l'énergie potentielle et de l'énergie interne de ce système, soit : $E_T = E_c + E_p + U$.
- 6 – Dans l'application de la loi de Hess, les équation-bilans.....

-2	-1	1	2
----	----	---	---

intervenant dans les calculs doivent obligatoirement correspondre à des réactions réalisables en laboratoire.

- 7 – La notion de «chaleur latente» ne correspond pas en.....
réalité à une chaleur.

-2	-1	1	2
----	----	---	---
- 8 – Au cours de la transformation $O_2(g)_{298} \rightarrow O_2(g)_{373}$
la variation d'enthalpie est nulle.

-2	-1	1	2
----	----	---	---
- 9 – Le cycle de Hess peut s'appliquer à la détermination.....
de $\Delta_r U^\circ$.

-2	-1	1	2
----	----	---	---
- 10 – Soit la réaction $CO_2 + CaO \rightarrow CaCO_3$ et $\Delta_r H^\circ$ son enthalpie...
standard de réaction. On a $\Delta_r H^\circ = \Delta_r H^\circ_{(CaCO_3)}$

-2	-1	1	2
----	----	---	---
- 11 – Si pour la réaction $C + O_2 \rightarrow CO_2$ la variation d'enthalpie.....
de réaction vaut -393 kJ.mol^{-1} alors pour la réaction
 $CO_2 \rightarrow C + O_2$ la variation d'enthalpie vaut $+393 \text{ kJ.mol}^{-1}$

-2	-1	1	2
----	----	---	---
- 12 – La variation d'enthalpie est une forme particulière
de la chaleur.

-2	-1	1	2
----	----	---	---

Cet article a été reçu le 26/02/98 et accepté le 24/11/98.

Aperçu des avantages et des inconvénients des conférences informatisées et des outils hypermédia dans la formation des maîtres

Overview of the Advantages and Inconveniences of Computer Conferencing and Hypermedia Tools for Teacher Education

Nancy CHAPUT, Diane BIRON

Faculté d'éducation, Université de Sherbrooke
2500 boulevard de l'Université
Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada.

Résumé

L'étude de l'apport des outils informatiques dans la formation initiale des maîtres est de plus en plus fréquente. Nous dresserons, à travers quatorze expérimentations qui ont utilisé soit les conférences informatisées soit des outils hypermédia, un aperçu des principaux avantages et inconvénients de ces moyens qui se dégagent de leur utilisation à l'intérieur de cours universitaires. Des pistes sont abordées dans le but d'aider à optimiser leur utilisation à des fins d'apprentissage et d'enseignement.

Mots clés : *formation des maîtres, outils informatiques, conférences informatisées, multimédia, technologies.*

Abstract

The use of new technologies in research with preservice teachers is actually quite frequent. We will examine the results of fourteen researchers that used electronic conferencing or multimedia by looking at their actual efficiency and at their principal deficiency. Some guidelines will be presented to help optimize the use of new technologies in training teachers.

Keys words : *teacher education, software tools, computer conferencing, multimedia, technologies.*

Resumen

El estudio sobre los aportes de las herramientas informáticas en la formación del docente es cada vez más frecuente. Se prepara, a través de catorce experimentaciones que se utilizaron en conferencias informáticas o en equipos hipermedias, un resumen de las principales ventajas e inconvenientes que se obtienen de la utilización de estos medios en los cursos universitarios. También se presentan algunas pistas de cómo optimizar su utilización en el proceso enseñanza - aprendizaje.

Palabras claves : *formación de maestros, equipos informáticos, conferencias informatizadas, multimedia, tecnologías.*

1. INTRODUCTION

Les technologies de l'information et de la communication (TIC) occupent maintenant l'ensemble des secteurs de la société et bien entendu le domaine de l'éducation n'échappe pas à cette tendance. En réponse aux nouveaux besoins que cette situation génère, les programmes de formation des maîtres incluent à présent des cours qui permettent aux étudiants de se familiariser avec les TIC. Il existe plusieurs façons de procéder à leur intégration et chacune d'elles offre avantages et inconvénients. Notre intention n'est pas ici d'explorer toutes les manières de faire mais plutôt d'examiner la situation à travers l'usage de certains outils informatiques.

Les technologies actuelles permettent maintenant d'envisager des contextes d'apprentissage et d'enseignement différents du recours à un manuel scolaire et peuvent favoriser les échanges et la prise en charge des apprentissages par l'apprenant, comme nous le verrons plus loin. Les

conférences informatisées et les outils hypermédia constituent en ce sens des moyens qui permettent de susciter une interaction et des façons nouvelles d'aborder un contenu. Les quatorze recherches examinées ont tenté d'utiliser le potentiel de ces technologies en fournissant des occasions pour une plus grande participation de l'apprenant et un suivi du professeur. Pour l'ensemble de ces quatorze projets, c'est à l'intérieur même de cours déjà prévus au programme de formation des maîtres que les outils informatiques ont été intégrés. Les projets dont nous présentons les avantages et les inconvénients ont pour objectifs de compléter et d'enrichir les formules habituelles de formation et n'ont pas pour but de les remplacer. Aussi faut-il mentionner que, même si certaines de ces expérimentations sont relativement anciennes, elles mettent néanmoins en évidence des comportements qui perdurent et qu'il nous semble nécessaire de rappeler si on veut les prendre en compte.

2. CONFÉRENCES INFORMATISÉES

Les conférences informatisées comprennent notamment le courrier électronique, les groupes de discussion et les téléconférences. Par l'intermédiaire d'un réseau, des personnes situées à des endroits différents peuvent communiquer entre elles en temps réel ou différé.

Dans le projet mené par Shipley (1990), par exemple, l'ensemble des quatre-vingt-cinq étudiants inscrits au programme de formation des maîtres du primaire à l'université Nova aux États-Unis ont accès, en plus des cours dits traditionnels, à un groupe de discussion où des praticiens ou encore des membres du corps professoral échangent en temps réel sur un sujet donné concernant un aspect abordé à l'intérieur du cours. Ces étudiants peuvent, à un autre moment, soumettre une question par le moyen d'un courrier électronique et donner leur opinion à différentes questions formulées par d'autres personnes. Ils peuvent également communiquer avec la personne responsable du cours. D'autres, comme Thompson & Hawk (1996), utilisent les vidéoconférences. Par ce moyen, la personne responsable du cours et l'apprenant peuvent effectuer une mise au point en échangeant verbalement et visuellement des informations en temps réel. Cette initiative s'ajoute aux modalités habituelles (rencontres, rapport de stage, etc.) prévues afin d'accompagner et de superviser les futurs maîtres dans leurs stages pratiques. Au total, soixante-six étudiants inscrits au programme de formation des maîtres de l'université North Carolina ont pris part à cette expérimentation et autant ont constitué un groupe témoin. Différents enseignants de niveau primaire ont également collaboré au projet et les conclusions de cette recherche, tout comme celles d'autres études, mettent en évidence plusieurs avantages et inconvénients qu'il convient maintenant d'aborder.

2.1. Les avantages

À la lumière des résultats qui se dégagent des huit recherches retenues ayant eu recours aux conférences informatisées (Shipley, 1990 ; Hansen et al., 1991 ; de Harrington, 1993 ; Ellsworth, 1995 ; Fox et al., 1996 ; Thomas et al., 1996 ; Thomson & Hawk, 1996 ; Whitaker & Hill, 1996), il semble que plusieurs avantages soient à retirer de l'intégration de ce type d'outils dans un programme de formation initiale des maîtres. En effet, tous les auteurs s'entendent pour dresser un bilan positif des expériences qu'ils ont menées. Les avantages les plus souvent exprimés concernent la formation, la logistique et les économies réalisées.

Du point de vue de la formation, Hansen et al. (1991) considèrent que les conférences informatisées favorisent les échanges entre les apprenants et rendent possible le développement d'habiletés sociales et académiques. Dans un même ordre d'idée, Ellsworth (1995) considère que les conférences informatisées, par la démarche exploratoire qu'elles privilégient, permettent de s'adapter aux différents apprenants. Les chercheurs Fox et al. (1996) abondent dans le même sens lorsqu'ils soulignent l'effet facilitateur des conférences informatisées pour les projets d'apprentissage coopératif et pour la construction des connaissances. Harrington (1993) ajoute que l'utilisation des conférences informatisées dans le cadre de ses cours s'est traduite par une augmentation de l'autonomie et de la responsabilisation des apprentissages et par une richesse et une variété dans les opinions exprimées. Cet avantage s'explique, selon Harrington (1993), Ellsworth (1995) et Whitaker & Hill (1996), par le fait que les barrières liées à la gêne et au statut hiérarchique qui limitent souvent les interactions lors de situations normales sont moins grandes en contexte de conférences informatisées. Ainsi, ces dernières favorisent des échanges plus riches et plus authentiques. L'aspect interactif des conférences informatisées est un avantage également souligné par Ellsworth (1995). Toujours selon cet auteur, les courriers électroniques et les groupes de discussion permettent une meilleure préparation aux examens puisque, si un étudiant se pose une question, il est plus facile et plus rapide pour lui d'obtenir des réponses. Les étudiants travaillent également davantage d'une façon coopérative plutôt que compétitive. Thomas et al. (1996) observent que l'un des avantages premiers des conférences informatisées est, sans contredit, le fait qu'elles proposent un moyen supplémentaire de communication entre les différentes personnes impliquées dans la préparation des futurs maîtres. À cet effet, Ellsworth (1995) souligne que les conférences informatisées ont été un moyen de resserrer les liens entre les différents intervenants du milieu de l'éducation (étudiants, enseignants, directeurs, formateurs et superviseurs universitaires). Outre les avantages directement liés aux objectifs du cours, les travaux réalisés par Thomas et

al. (1996) ainsi que ceux d'Harrington (1993) montrent que, sur le plan de la formation générale, l'expérimentation, par de futurs enseignants, des nouvelles technologies en contexte de tâches significatives pendant la formation, favorise l'émergence d'une attitude positive à leur égard et, ultérieurement, permet une intégration de ces dernières dans la planification et l'organisation pédagogique de ces futurs enseignants.

En ce qui concerne la logistique, Harrington (1993) soutient que l'apprentissage réalisé dans un environnement informatique ne requiert que peu de connaissances techniques. Ainsi l'apprenant peut se concentrer sur le contenu plutôt que sur la maîtrise des commandes de l'outil informatique. Par ailleurs, Shipley (1990) mentionne que les conférences informatisées permettent d'exploiter les ressources et les équipements déjà en place dans les universités et qu'elles ne nécessitent aucune mobilisation de laboratoires informatiques pour des périodes déterminées. Par exemple, les personnes intéressées par l'utilisation des conférences informatisées peuvent le faire peu importe le moment de la journée ou l'endroit où elles se trouvent, il suffit qu'elles aient accès au réseau.

Cette caractéristique des conférences informatisées, qui permet d'éliminer des barrières géographiques et temporelles, nous amène à considérer les économies réalisées. En effet, selon Thomson & Hawk (1996) et Thomas et al. (1996), leur projet a été très satisfaisant et rentable au niveau des économies réalisées en temps facturé et en frais de déplacement des superviseurs. Sans compter que, toujours selon ces auteurs, ces économies n'influencent en rien la qualité de la formation puisque les superviseurs ont davantage de sources d'information sur lesquelles basées leur évaluation contrairement à un petit nombre de rencontres selon l'ancienne formule. De plus, les économies réalisées permettent une augmentation du nombre de personnes impliquées dans la supervision des futurs enseignants et, par conséquent, une meilleure qualité de la formation dispensée.

2.2. Les difficultés

Malgré l'enthousiasme manifesté par les chercheurs concernant l'utilisation des conférences informatisées à l'intérieur de leurs cours, des difficultés ont émergé lors de l'expérimentation tant au niveau des ressources techniques et logistiques qu'au niveau du contrôle de l'investissement des individus et qu'au niveau de l'utilisation des ressources humaines.

Au point de vue des difficultés techniques et logistiques, Whitaker & Hill (1996) soulignent la frustration vécue par certains étudiants à cause de la fragilité et de la lenteur du réseau télématique. De la même façon,

une insuffisante accessibilité aux équipements informatiques a été source d'attitudes négatives chez les étudiants participant aux travaux de Hansen et al. (1991). Ce fut également un problème rencontré par Ellsworth (1995) qui déplore un manque de ressources informatiques mises à la disposition de son projet. Ainsi, ces auteurs mettent en évidence l'importance, pour les universités, de se munir d'un système informatique efficace et fiable si elles veulent permettre des projets innovateurs ayant recours aux conférences informatisées. Outre les conditions matérielles dans lesquelles se sont déroulés les différents projets, Thomas et al. (1996) ainsi que Hansen et al. (1991) rappellent que même si les conférences informatisées ne demandent que peu de connaissances techniques, il ne faut surtout pas négliger le fait qu'un support technique est nécessaire pour les étudiants encore peu familiers avec l'utilisation de l'ordinateur. Harrington (1993) précise que la personne responsable du cours doit être à l'affût de l'anxiété ressentie chez certains étudiants face à l'utilisation des technologies.

En ce qui concerne le contrôle de l'investissement des individus, Ellsworth (1995) est d'avis que, dans le but d'assurer la quantité et la qualité des échanges réalisés sur supports électroniques, des moyens coercitifs doivent être mis en place. L'absence d'une quelconque forme d'évaluation s'est traduite, dans le cas de cette recherche, par une faible participation des étudiants. De plus, lorsque le contenu des échanges n'est pas évalué, Hansen et al. (1991) ont remarqué que les étudiants ne semblent faire d'efforts ni pour être originaux dans leurs réponses ni pour établir des liens avec les autres contenus du cours lors des discussions à thème imposé. Les thèmes libres sont souvent consacrés à des sujets d'ordre personnel et donc hors contexte. Ce qui fait dire à ces auteurs que les étudiants s'investissent sous certaines conditions d'évaluation du contenu et de la participation.

Quant à la rentabilité de ce type d'outil informatique en termes d'utilisation des ressources humaines, il semble qu'à court terme le temps et l'énergie consacrés à la préparation et au bon fonctionnement des conférences informatisées soient énormes. Selon Harrington (1993), il faut ajouter aux énergies déployées pour le développement de ce type d'outil le temps de supervision quotidienne des échanges. Cette supervision régulière est nécessaire afin, d'une part, de suppléer aux rétroactions non-verbales qui sont absentes des échanges informatisés et, d'autre part, d'éviter que les conversations deviennent très complexes et créent de la confusion chez les utilisateurs. Lors de cette supervision, la personne responsable a également le mandat, selon Hansen et al. (1991), d'inciter les étudiants à fournir des arguments pertinents pour justifier leurs opinions puisque peu d'entre eux sont en mesure de le faire spontanément. Malgré les efforts à déployer pour le développement et la supervision des outils informatiques,

Ellsworth (1995) soutient que c'est un prix qu'il est prêt à payer puisque les conférences informatisées permettent une flexibilité des horaires et, qu'à long terme, elles deviennent un outil intéressant et rentable.

3. HYPERMÉDIA

L'outil hypermédia consiste en l'utilisation simultanée d'hyperliens et du multimédia. Ainsi, des documents écrits, des bandes sonores et des extraits vidéo peuvent être connectés entre eux par un lien informatique. L'utilisation la plus commune de ce type d'outil dans la formation des maîtres est celle rapportée par Marsh & Kumar (1992). Ce projet a été expérimenté dans le cadre du programme de formation des maîtres de l'université Vanderbilt auprès d'une centaine d'étudiants. Cette utilisation consiste à filmer des séquences d'enseignement qui illustrent une problématique précise et à les lier à des extraits sonores et des documents écrits. À l'aide de ce support, par exemple, un étudiant peut visionner une intervention, écouter les commentaires de l'enseignant concernant la pertinence de son intervention et effectuer des lectures à propos des fondements théoriques sur lesquels repose cette intervention.

3.1. Les avantages

Les principaux avantages relevés à l'intérieur des sept recherches retenues qui ont utilisé cet outil sont de trois ordres : les possibilités techniques, les répercussions positives sur l'apprentissage et le développement d'attitudes propres à la pratique professionnelle.

Au niveau technique, les travaux menés par Marsh & Kumar (1992) ont permis de montrer l'efficacité et la pertinence de l'outil hypermédia pour l'organisation d'une très grande quantité d'informations. Abell et al. (1996) considèrent que cette caractéristique de l'hypermédia, qui permet de gérer d'une façon non traditionnelle l'ensemble des documents audiovisuels et des documents écrits sélectionnés, rend possible la représentation d'une variété de situations complexes quotidiennes vécues en classe. Ainsi, par l'aspect pratique que procure l'outil, l'utilisation de l'hypermédia s'avère intéressante et pertinente dans le cadre de la formation des maîtres.

Pour ce qui est des apprentissages relatifs au contenu du cours, il semble selon Lampert (1994) et Abell et al. (1996) que l'utilisation de l'hypermédia favorise une approche davantage constructiviste de l'apprentissage et un enseignement qui permet le recours à différentes démarches pour développer les connaissances. Goldman & Barron (1990)

tout comme Lampert (1994) mettent également en relief le fait que les outils hypermédia permettent à l'apprenant d'être actif dans son apprentissage et augmente le contrôle sur ses apprentissages. En effet, selon ces auteurs, l'outil informatique peut s'adapter aux expériences et aux connaissances antérieures d'un apprenant. De plus, Hochman et al. (1993) soulignent que l'outil hypermédia donne la possibilité d'organiser le contenu du cours d'une façon non linéaire. En outre, Lampert (1994) est d'avis que l'outil hypermédia permet de faire simultanément le parallèle entre l'enseignement et l'apprentissage. C'est ainsi que cet outil sensibilise les étudiants aux différentes façons d'apprendre et permet, selon Abell et al. (1996), une meilleure compréhension des théories de l'apprentissage et de l'enseignement. Dans le même sens, Goldman & Barron (1990) soutiennent qu'il est possible, grâce à cet outil, de mettre en évidence et d'étudier les facteurs qui influencent l'enseignement et l'apprentissage. Grâce à l'outil hypermédia, Lampert (1994) soutient lui aussi que l'autonomie et la prise en charge des apprentissages sont favorisées. De façon générale, Hochman et al. (1993) concluent que l'utilisation de l'outil hypermédia se traduit chez l'étudiant par un taux de satisfaction élevé en regard des apprentissages réalisés et du travail effectué.

En ce qui concerne le développement d'attitudes propres à la pratique professionnelle, Lambert (1994) est d'avis que l'outil hypermédia offre une alternative au rôle de l'enseignant dispensateur du savoir afin de privilégier celui de guide et de planificateur. En effet, comme Abell et al. (1996) le soulignent, l'outil hypermédia permet de voir simultanément les multiples facettes d'une intervention en contexte réel d'enseignement. D'ailleurs ce dernier avantage permet de suppléer à une pratique qui n'est pas toujours idéale. Par exemple, selon Abell et al. (1996), les étudiants qui font des stages dans une classe où l'enseignement se fait de façon traditionnelle peuvent, à l'aide de l'outil hypermédia, se familiariser avec d'autres modèles d'enseignement. C'est ce qui fait dire à Goldman & Barron (1990) que l'utilisation de cet outil dans le cadre d'un cours permet le développement non seulement de connaissances, mais également des attitudes nécessaires à la pratique professionnelle. Ces auteurs ajoutent que les étudiants ont grandement apprécié l'étude des aspects théoriques à partir d'exemples tirés de la pratique. De plus, Abell et al. (1996) soulignent que les activités réalisées avec des outils hypermédia diminuent l'anxiété due à l'enseignement d'une première leçon. En outre, Hochman et al. (1993) rapportent que plusieurs des étudiants ont réinvesti dans leurs stages des projets réalisés dans le cadre du cours. Une autre constatation de Goldman & Barron (1990) concerne le développement d'une attitude positive et d'un intérêt plus marqué pour la discipline enseignée (ici les mathématiques) à la suite de l'expérimentation réalisée à l'aide de l'outil hypermédia.

Outre ces avantages, Hochman et al. (1993) tiennent à souligner l'implication inattendue des différentes personnes de la Faculté. Cette solidarité qui s'est manifestée de manière spontanée a contribué, de façon significative, à la réussite du projet. De plus, ces auteurs ont remarqué un changement d'attitudes à l'égard des TIC même chez les membres du corps professoral.

3.2. Les difficultés

Tout comme ce fut le cas pour les travaux utilisant les conférences informatisées, les chercheurs ayant intégré l'outil hypermédia à leur enseignement ont dû surmonter plusieurs obstacles pour mener à terme leur projet. Les difficultés les plus souvent mentionnées par ces derniers sont de l'ordre des ressources techniques et matérielles, de la formation et des procédures administratives.

Au niveau de l'aspect technique et matériel, Hochman et al. (1993) se sont heurtés à un obstacle d'incompatibilité et d'indisponibilité des logiciels accessibles aux étudiants. Ainsi, le logiciel utilisé par les chercheurs n'était pas disponible dans les laboratoires fréquentés par les personnes inscrites au cours. De plus, les personnes chargées d'assurer le support n'avaient pas été informées du projet et, par conséquent, n'ont pas été en mesure de répondre adéquatement aux questions d'ordre technique des étudiants. Quant à Goldman & Barron (1990), ils soulignent que le développement de tels outils est très dispendieux en temps et en argent, que plusieurs matériaux ont depuis été commercialisés et qu'il est donc moins pertinent d'en créer de nouveaux.

Quant aux difficultés liées à la formation qui se dégagent des travaux utilisant l'outil hypermédia dans un cours, la grande majorité se situe, selon Lampert (1994), au niveau de l'insécurité due à une expérience non conventionnelle. Si cela tendra à se dissiper avec le temps puisque les étudiants sont de plus en plus amenés à utiliser l'informatique dans différents contextes, il n'en demeure pas moins que, selon Hochman et al. (1993), le manque d'expérience avec l'ordinateur est le facteur le plus déterminant dans l'apparition d'attitudes négatives en cours d'expérimentation. Ces auteurs soulignent également qu'ils ont eu tendance à sous-estimer le temps de formation, nécessaire en classe, pour l'utilisation du logiciel. Ce qui fait dire à Goldman & Barron (1990) qu'il ne faut pas perdre de vue la difficulté, pour les étudiants, de se concentrer à la fois sur le fonctionnement de l'ordinateur et sur le contenu à apprendre. À ce sujet, Lampert (1994) souligne que le mandat est double pour les étudiants, d'une part ils doivent apprendre à enseigner et d'autre part, cet apprentissage s'effectue selon

une approche qui leur est inconnue. Toujours au niveau de l'insécurité ressentie par les étudiants, Marsh & Kumar (1992) mentionnent que le grand nombre de combinaisons possibles entre les différents liens de l'outil hypermédia crée une peur de ne pas avoir parcouru tout ce qu'il y avait à voir. De plus, Hochman et al (1993) soulignent que, puisque les apprentissages s'effectuaient aux rythmes de chacun, certaines personnes ont eu de la difficulté à se discipliner et à être autonomes dans leurs apprentissages.

Les difficultés liées aux procédures administratives semblent avoir joué un rôle négatif dans le cadre de certains projets. En effet, pour Lampert (1994), le manque de confiance de la part des administrateurs lui a fait perdre beaucoup de temps en réunions d'explication et de justification. Goldman & Barron (1990) déplorent également les nombreux formulaires et la paperasse inutile qu'il a fallu remplir pour obtenir le soutien de plusieurs comités facultaires et universitaires. Ce qui fait dire à Goldman & Barron (1990) que l'indulgence et la compréhension des administrateurs est une condition préalable à la réalisation de ce genre de projets. Aussi, Lampert (1994) soulève-t-il le fait que les outils hypermédia, par la souplesse des apprentissages qu'ils suscitent, rendent difficile de fournir aux étudiants un plan de cours statique. De plus l'auteur ajoute que les administrateurs, tout comme les étudiants par ailleurs, doivent comprendre que tout ne fonctionnera pas parfaitement la première fois et que des ajustements seront nécessaires.

4. CONCLUSION

Les travaux examinés permettent de relever des constats communs à la majorité des auteurs consultés. D'une part, le recours à des conférences électroniques et à des outils hypermédia s'avère une façon fructueuse d'intégrer les TIC à l'enseignement universitaire en donnant notamment une pertinence à leur utilisation et en améliorant la formation elle-même. Une plus grande autonomie et une responsabilisation des apprentissages par les apprenants sont certes des retombées positives associées à leur utilisation. D'autre part, les progrès technologiques et l'accessibilité des technologies sont des conditions facilitant leur usage et leur intégration dans la formation, conditions sans lesquelles il serait difficile d'envisager leur utilisation en contexte universitaire et voire scolaire. Bien entendu, plus les écoles et les universités offriront des ressources disponibles et accessibles et plus les gens pourront se familiariser avec ces outils et même créer leur propre approche et leur propre matériel. Enfin, malgré les grands avantages tirés des expérimentations et dont nous avons fait état, il n'en demeure pas moins que l'utilisation des TIC est encore dans une situation

précaire en raison particulièrement des coûts associés à leur développement et à leur maintien. Des soutiens technique et financier doivent être assurés et prévus avant, pendant et surtout après les expérimentations. Le partage des expériences et des ressources, tant chez les professeurs que chez les étudiants, est certes un esprit qu'il faut chercher à cultiver et à encourager dans cette grande aventure de l'insertion des TIC dans la formation universitaire afin d'éviter les mêmes écueils et pour pousser plus loin leur potentiel et leurs retombées.

BIBLIOGRAPHIE

- ABELL S.K., CENNAMO K.A., ANDERSON M.A. & BRYAN L.A. (1996). Integrated media classroom cases in elementary science teacher education. *Journal of computers in mathematics and science teaching*, vol. 15, n° 1/2, pp.137-151.
- ELLSWORTH J.H. (1995). Using computer-mediated communication in teaching university courses. In Z.L. Berge & M.P. Collins (Éds), *Computer mediated communication : the online classroom*. Cresskill, Hampton Press, pp. 29-36.
- FOX L., THOMPSON D. & CHAN C. (1996). Computers and curriculum integration in teacher education. *Action in teacher education*, vol. XVII, n° 4, pp. 64-73.
- GOLDMAN E. & BARRON L. (1990). Using hypermedia to improve the preparation of elementary teachers. *Journal of teacher education*, vol. 41, n° 3, pp. 21-31.
- HANSEN E., BROWN B., CHONG S.-M., KUBOTA K., TOTTEN N. & HUBBARD L. (1991). *Computer conferencing for collaborative learning in large college classes. Final report of a grant project*. Indiana, Telecommunication Advancement Foundation of Indiana University.
- HARRINGTON H. (1993). The essence of technology and the education of teachers. *Journal of teacher education*, vol. 44, n° 1, pp. 5-15.
- HOCHMAN A., MAURER M. & ROEBUCK D. (1993). Buttons and cards and fields, Oh my ! *Tech Trends*, vol. 38, n° 2, pp. 25-28.
- LAMPERT M. (1994). Using technology to support a new pedagogy of mathematics teacher education. *Journal of special education technology*, vol. 12, n° 3, pp. 276-289.
- MARSH E.J. & KUMAR D.D. (1992). Hypermedia : A conceptual framework for science education and review of recent findings. *Journal of special education multimedia and hypermedia*, vol. 1, n° 1, pp. 25-37.
- SHIPLEY D. (1990). *Computer education for teachers of young children : a developmentally-based training module. Practicum report II*. Nova, Nova University.
- THOMSON W.S. & HAWK P.P. (1996). Project DIST-ED : Teleconferencing as a means of supporting and assisting beginning teachers. *Action in teacher education*, vol. XVII, n° 4, pp. 9-17.
- THOMAS L., LARSON A., CLIFT R. & LEVIN J. (1996). Integrating technology in teacher education programs : Lessons from the teaching teleapprenticeship project. *Action in teacher education*, vol. XVII, n° 4, pp. 1-8.
- WHITAKER E. & HILL E. (1996). Current conversations. *Action in teacher education*, vol. XVII, n° 4, pp. 79-82.

■ COMPTE RENDU D'INNOVATION

Report of innovation

Quelles activités de formation pourrait-on mettre à l'œuvre avec les stagiaires de l'ENS en vue d'assurer une adéquation entre la formation à la didactique et la pratique professionnelle au lycée ? : compte rendu d'innovation

What training activities can be executed with the preservice teachers of ENS so as to remedy to the inadequacy existing between theoretical and practical training in science education ? : report of innovation

Mohammed KOUHILA

Groupe GIREST
École Normale Supérieure
BP 2400
Marrakech, Maroc.

Résumé

L'article expose une nouvelle stratégie de formation à la didactique de la physique basée sur l'analyse épistémologique du fonctionnement de la discipline. Il s'agit de l'élaboration d'un module de formation des professeurs stagiaires de la cinquième année (PC₅) de l'ENS'. En partant des difficultés et des paradoxes vécus par l'auteur, ce travail aborde la question de l'articulation de la formation didactique avec les stages de terrain au lycée. Les activités de formation expérimentées se proposent de remédier au problème de l'inadéquation entre les deux formations théorique et pratique.

Mots clés : analyse épistémologique, formation des enseignants, analyse de manuels, didactique, physique.

Abstract

This paper suggests a new training strategy in science education based upon the epistemological analysis of physics. It consists of elaborating a training module for preservice teachers of the fifth year of ENS of Marrakech (PC₅). The present study reports the difficulties and the paradoxes encountered by the author. The suggested training activities contribute to remedy to the inadequacy observed between practical and theoretical training in science education.

Key words : epistemological analysis, teachers' training, textbook analysis, science education, physics.

Resumen

El artículo expone una nueva estrategia de formación en didáctica de la física, basada en el análisis epistemológico del funcionamiento de la disciplina. Se trata de la elaboración de un módulo para estudiantes del quinto año de la carrera docente (PC5) de la Escuela Normal Superior. Partiendo de las dificultades y paradojas vividas por el autor, este trabajo aborda el punto de la articulación entre la formación didáctica y la práctica profesional en el liceo. Las actividades de formación experimentales persiguen remediar el problema de la falta de adecuación entre la formación teórica y la práctica profesional.

Palabras claves : análisis epistemológico, formación docente, análisis de libros textos, didáctica, física.

1. INTRODUCTION

Au Maroc, depuis la réforme de 1985 et jusqu'à l'avènement du premier « curriculum de sciences physiques » (Ministère de l'Éducation Nationale, 1996a, 1996b), les inspecteurs incitent les enseignants du secondaire à préparer des fiches pédagogiques (fiche de la leçon). La fiche de préparation proposée comprend les objectifs de la leçon, les capacités visées, les activités d'enseignement/apprentissage à mettre en œuvre, ainsi que les outils d'évaluation adoptés (annexe 1). Ce type de fiche ne tient compte ni de la spécificité ni du fonctionnement de la discipline et semble ignorer l'analyse épistémologique. Pour combler cette « lacune », nous avons mis au point des activités de formation en didactique qui permettent d'élaborer avec les stagiaires de l'ENS un outil méthodologique (fiche épistémologique) prenant en considération le fonctionnement propre de la physique.

Avant qu'il ne planifie son enseignement, cette fiche invite l'enseignant à se poser des questions sur les concepts clés de la physique, le statut de l'expérience et son articulation avec le modèle, le rôle des modèles dans l'apprentissage et l'enseignement de la physique, et enfin sur les démarches et les raisonnements à mettre en œuvre avec les élèves. En plus des vigilances didactique et scientifique (Beaufils, 1995) requises chez l'enseignant, la fiche épistémologique invite l'enseignant à être également vigilant sur le plan épistémologique en réfléchissant sur certains concepts « méta-théoriques » véhiculés par l'enseignement tels que l'expérience ou le modèle.

L'objectif principal de ce travail vise à fournir à un enseignant de sciences physiques des outils méthodologiques qui lui permettent :

- d'apprendre à faire une analyse conceptuelle des notions à enseigner et construire la trame conceptuelle d'une leçon ;
- d'analyser le rôle des expériences qu'il va faire dans sa classe ;
- de comprendre et d'analyser les raisonnements spontanés de ses élèves et les raisonnements développés dans les manuels d'enseignement ;
- d'analyser les fonctions des modèles dans la physique scolaire.

2. PROBLÉMATIQUE D'UNE FORMATION INITIALE EN DIDACTIQUE DE LA PHYSIQUE

D'après Astolfi & Develay (1989), la didactique des sciences s'intéresse aux processus d'acquisition et de « transmission » des savoirs. Il faut noter que la formation à la didactique de la physique ne prétend pas résumer à elle seule la totalité d'une formation nécessaire pour enseigner la physique (Astolfi et al., 1997a).

À l'ENS de Marrakech, le formateur en didactique des sciences physiques vit un double paradoxe qu'il doit gérer. D'un côté, il conseille aux stagiaires d'éviter un enseignement dogmatique ; mais il peut « enseigner » lui-même de façon dogmatique. D'un autre côté, il préconise aux stagiaires des modèles d'enseignement s'inscrivant dans une perspective socio-constructiviste alors qu'ils seront amenés à enseigner dans un paradigme inductiviste.

Par ailleurs, les stagiaires ont constaté, au cours de leurs stages au lycée, un écart notable entre la formation théorique et la pratique professionnelle. Saint-Georges & Bonnefois (1998) ont soulevé cette question de l'articulation de la formation didactique en IUFM avec les stages de terrain en lycée et collège. Cependant, leur analyse a porté exclusivement sur des situations de travaux pratiques dans le dispositif de formation qu'ils ont proposé.

Viennot (1997) met l'accent sur la nécessité de l'imbrication entre la réflexion didactique et le contenu disciplinaire. L'objectif de son travail est d'approfondir chez les stagiaires les contenus physiques en leur faisant jouer à la fois le rôle « d'analyste » et celui de « cobaye » dans toute pratique de formation. Quant à Astolfi et al. (1997a), ils ont proposé des situations de formation continue en didactique des sciences. Ces mêmes situations sont-elles aussi valables en formation initiale ? D'autre part, ils n'ont pas évoqué le problème de l'inadéquation possible entre une formation théorique à la didactique et la pratique professionnelle.

Si nous nous référons à nos anciennes pratiques, nous constatons, au fil des années, que les stagiaires ne rentrent plus dans le cadre de référence dans lequel nous les formons. On se demande si les travaux de recherche en didactique ne devraient pas subir une « transposition didactique » avant de devenir des objets de formation. En effet, en dépit de l'existence d'un programme élaboré par le corps formateur ² (annexe 2), nous nous heurtons toujours à l'éternel problème : « *comment traduire ce programme en pratiques formationnelles adéquates ?* » Nous avons essayé, au fil des années, plusieurs modules de formation, mais aucun ne nous a donné pleine satisfaction.

Nous avons fait de l'adéquation entre la formation théorique et la pratique professionnelle, notre objectif prioritaire. Ainsi, en s'inscrivant dans la même ligne de pensée que les auteurs cités ci-dessus, notre question de recherche pourrait être formulée ainsi : *Quel dispositif de formation pourrait-on adopter avec les stagiaires de PC₅ afin d'assurer une formation initiale (en didactique et en épistémologie de la physique) qui soit en parfaite concordance avec les activités d'enseignement pratiquées lors des stages au lycée ?*

3. ÉLABORATION D'UN MODULE DE FORMATION

3.1. Principes d'une formation initiale en didactique de la physique

Astolfi et al. (1997a) ont montré que la formation des enseignants est souvent conçue comme un transfert d'information. À l'ENS de Marrakech, les formations pratiquées ne cessent de susciter débats et controverses, surtout en didactique et en physique. Les pratiques, qui confondent l'enseignement et la formation, laissent entendre que cette dernière est synonyme d'un transfert mécanique de savoirs tout faits d'un formateur, détenteur de connaissances absolues, à un formé ayant acquis quelques savoirs fragmentés. Le discours fréquent est éloquent à ce sujet : « *les stagiaires ont des lacunes, le niveau a baissé, etc.* »

À la suite de notre expérience professionnelle, de nos stages en France et de nos travaux de recherche, nous définirons « *la formation des enseignants, comme étant l'apprentissage de la gestion d'un certain nombre de choix, de contradictions et de tensions en faisant certains rejets et certaines éliminations.* » (Maarouf & Kouhila, soumis pour publication).

Enfin, nous pensons à la suite de Astolfi et al. (1997a, 1997b), que toute pratique de formation en didactique des sciences devrait reposer sur les trois principes qui suivent :

1^{er} principe : le formé doit être impliqué dans l'activité de formation qui lui est proposée. Il est préférable de lui faire jouer à la fois les rôles « *d'analyste* » et de « *cobaye* » (Viennot, 1997).

2^{ème} principe : les situations de formation proposées aux formés doivent entretenir un degré de *parenté* avec les situations d'enseignement que le stagiaire aura à installer pour ses élèves.

3^{ème} principe : le formateur doit *explicitement* le modèle pédagogique qu'il fait fonctionner, sans pour autant dicter la conduite future des formés.

3.2. Place du module de formation proposé dans la formation professionnelle

Chaque stagiaire est responsable d'une classe au lycée, pendant 8 h par semaine, sous la direction d'un « encadreur » et d'un « professeur d'application ». Il est aussi en formation à l'ENS pendant 25 h par semaine. Le module de formation décrit ici ne porte que sur la partie dite « épistémologie de la physique » du programme de didactique (100 h par an), soit 28 h par an, situés entre novembre et janvier 98. Cette partie de l'année correspond, au lycée, à l'enseignement de la mécanique dans la classe de première année scientifique (grade 10).

Nous avons proposé à nos stagiaires les thèmes du module 1 (voir les intitulés en annexe 2) sous forme d'une grille (tableau 1) qui pose le questionnement de chacun des thèmes auxquels ce module essaie de répondre. Ces questions sont bien explicitées aux stagiaires pour que les activités de formation envisagées aient un sens pour eux. En nous appuyant sur cette grille et en nous plaçant dans une problématique de transposition didactique, nous avons reformulé en concertation avec les stagiaires les six thèmes proposés dans le module 1 (annexe 2), dans le but de dégager des problématiques à traiter. Chaque thème a fait l'objet d'un travail de recherche publié ou soumis à publication. C'est cette reformulation du module 1 et surtout sa mise en œuvre, dans la pratique formationnelle, que nous présentons dans cet article.

L'objectif du module que nous avons retravaillé et reconstruit est de fournir à l'enseignant des outils méthodologiques qui lui permettent d'analyser les manuels d'enseignement de physique en tenant compte de la nature et du fonctionnement de la physique. Il faut noter qu'au Maroc, il n'existe pas de livre du professeur. Il existe un manuel national unique destiné aussi bien au professeur qu'à l'élève.

Thèmes du module 1	Questionnement	Éléments d'analyse
Conceptualisation	Quel type de concept est présenté ?	– concept classificatoire ; – concept formel...
	Comment les concepts sont-ils introduits ?	– reconstruction ; – présentation toute faite.
	– Quel niveau de formulation est mis en œuvre ? À quelle question répond ce concept ?	Recherche des niveaux de formulation des concepts.
	Quel problème terminologique le concept pose-t-il ?	Recherche de la différence entre les sens conventionnels et courants du concept.

	Comment les concepts sont-ils reliés entre eux ?		Recherche de relations et de trames conceptuelles.
Modélisation	– Quel est le type de modèle présenté ? – À partir de quel champ théorique a-t-il été construit ?		– modèle analogique ; – modèle descriptif ; – modèle symbolique...
	Comment s'articulent différents modèles d'une même situation ?		– emboîtement des modèles ; – exclusion des modèles.
	– Comment le modèle est-il introduit ? – Par rapport à quelles questions le modèle proposé est-il pertinent ?		– proposer un modèle tout fait ; – reconstruire par l'élève.
Expérimentation	Quelle catégorie d'expérience est réalisée ou décrite ?		- expérience de monstration ; - expérience de renforcement ; - expérience de référence...
	Quelle fonction joue cette expérience dans la construction du savoir de l'élève ?		– induire une loi physique ; – vérifier une hypothèse ; – déstabiliser une conception.
Modes de raisonnement	Quels modes de raisonnement sont mis en œuvre ?	Induction	Départ : une expérience Conséquence : une loi
		Déduction	Départ : une loi, un principe Conséquence : un théorème
		Analogie	Départ : situation habituelle Conséquence : situation nouvelle
		Contre-exemple	Départ : une hypothèse Conséquence : réfutation par l'expérience ou par un calcul
Formalisation mathématique	Quel rapport entre la physique et les mathématiques le manuel scolaire véhicule-t-il ?	Rapport sémantique	Donner un sens physique à une notion mathématique.
		Rapport de constitution	Construire formellement un concept physique.
		Rapport d'application	– exprimer formellement un concept ou une loi ; – utiliser les mathématiques comme moyen de calcul.
		Rapport indirect	Présenter une physique qualitative sans équations.

Tableau 1 : Grille du programme du module « épistémologie de la physique »³

3.3. Proposition de quelques activités de formation en épistémologie de la physique

Les situations de formation proposées permettent de développer, chez nos stagiaires, l'attitude réflexive et l'analyse fine entre autres. Nous rejetons en annexe 3 la liste complète des compétences visées par la formation à la didactique et à l'épistémologie de la physique.

3.3.1. La stratégie de formation

Le thème 0 du module 1 a fait l'objet d'un chapitre introductif aux problématiques traitées dans le module de formation que nous proposons. En revanche, pour chacun des thèmes 1 à 4, nous décrivons la stratégie de formation adoptée. Voici les intitulés des thèmes du module 1 tels qu'ils ont été reformulés à partir du programme de formation (annexe 2).

Thème 0 : Comment se forment, évoluent et fonctionnent les sciences physiques ?

Thème 1 : Les concepts en physique : approche *didactique* et *épistémologique*

Thème 2 : Le statut de l'expérience entre la physique savante et la physique à enseigner

Thème 3 : Approche logique des raisonnements canoniques et spontanés utilisés en physique scolaire

Thème 4 : Rôle des modèles dans le contexte de l'enseignement de la physique

Thème 5 : La problématique des rapports entre la physique et les mathématiques dans son lien avec l'épistémologie scolaire

Étant donné sa spécificité, le thème 5 a fait l'objet d'une présentation de deux heures. Il ne rentre pas dans la stratégie de formation proposée ci-dessous.

- **Phase 1** : une séance de simulation d'un micro-enseignement (une demi-journée) où les stagiaires présentent des séquences de cours de 15 minutes devant leurs camarades qui jouent le rôle des élèves. Chaque stagiaire est invité, soit à introduire un concept, soit à gérer une expérience, soit à présenter un modèle ou à développer un raisonnement. Tout le matériel expérimental nécessaire est mis à sa disposition. On fait visualiser (au magnétoscope) la séquence filmée ; le stagiaire fait une autocritique sur sa

prestation ; ses camarades lui font des remarques. Le formateur oriente, par exemple, la discussion vers les points suivants :

- Comment le stagiaire introduit-il le concept ?
- Quelle fonction attribue-t-il à l'expérience et au modèle ?
- Quel raisonnement met-il en œuvre ? etc.

Ensuite, le stagiaire est invité à refaire la même présentation pour voir à quel point il peut tirer profit des remarques et critiques qui lui ont été faites par ses collègues.

– **Phase 2** : une séance de deux heures pour présenter en détail le travail de recherche effectué sur le thème en question. À la fin de la séance, l'article qui traite le thème choisi, est fourni aux stagiaires, muni de quelques textes auxiliaires permettant de l'aborder.

– **Phase 3** : une deuxième séance de deux heures est consacrée à un débat sur l'article qui traite l'un des thèmes, la problématique qu'il aborde ainsi que la méthode d'analyse adoptée par l'auteur. Une discussion s'installe entre le formateur (qui peut être l'un des auteurs des articles remis) et les stagiaires. Cette discussion permet de critiquer l'article et de montrer qu'il existe des critères de validation, explicites et/ou souvent implicites, qui permettent l'acceptabilité d'un travail de recherche par la communauté scientifique et que l'évolution d'un travail de recherche dépend fortement de l'évolution du jugement de cette communauté à une époque donnée (Johsua & Dupin, 1993).

– **Phase 4** : la troisième séance de deux heures, sous forme d'atelier, est consacrée à l'exploitation de l'outil proposé par l'auteur en l'appliquant au manuel scolaire pour analyser une leçon. Au cours de cette séance, l'auteur propose un germe de grille qui est débattu par les stagiaires. Ainsi, les grilles proposées sont le fruit d'un processus de va et vient entre la théorie (articles de recherche qui traitent des quatre thèmes) et la pratique (analyse du manuel de physique). On présente dans ce qui suit les versions finales des grilles qui ont fait l'unanimité lors de leur application à l'analyse d'une leçon. Il faut noter que ces grilles ne sont ni rigides ni définitives. Elles peuvent être améliorées avec l'usage.

3.3.2. Les situations de formation

À partir des travaux présentés et débattus avec les stagiaires, nous proposons des activités de formation qui sont le fruit de quatre ateliers au terme desquels le formateur et les stagiaires ont pu élaborer les grilles d'analyse qui ont fait l'objet des situations de formation qui suivent.

Situation 1 : Analyse des concepts d'une leçon et construction d'une trame conceptuelle

La situation de formation relative à ce thème a été élaborée en s'appuyant sur les travaux de Jacobi (1993), de Lemeignan & Weil-Barais (1993) et de Kouhila (1998a). La grille, proposée au tableau 2, aide l'enseignant à catégoriser les concepts à enseigner, à réfléchir sur leur sens conventionnel et à les mettre en relation au sein d'une trame conceptuelle. En cultivant l'esprit de synthèse, ce genre d'analyse permet de dépasser les inconvénients de la présentation linéaire et fragmentée qui caractérise un manuel d'enseignement.

Typologie des concepts	Éléments de définition
Concepts non définis ou indéfinissables	Ce sont les concepts qu'on utilise en physique sans les définir comme le temps, la matière, l'espace, etc.
Concepts définis	Ce sont les concepts qu'on précise à l'aide de concepts non définis : la vitesse, l'accélération, etc.
Concepts classificatoires	Ils désignent des classes d'objets caractérisés par un ensemble d'attributs : le thermomètre, la pile, le voltmètre, etc.
Concepts quantitatifs formels et relationnels	Ils se définissent en relation avec d'autres concepts et sont mesurables : la force, la pression, l'énergie, etc.
Concepts formels non relationnels et qualitatifs	Ils résultent d'une construction mentale et sont non mesurables : le système, le référentiel galiléen, etc.
Concepts qualitatifs formels et hypothétiques	Ils renvoient à des entités hypothétiques postulées par les physiciens : l'atome, le point matériel, etc.
Concepts précurseurs	Ce sont les concepts préliminaires qui servent à introduire les concepts fondamentaux tels que l'action mécanique par exemple.

Tableau 2 : Grille d'analyse des concepts physiques introduits dans une leçon

Situation 2 : Le statut de l'expérience dans la physique à enseigner

La situation de formation a été élaborée en s'appuyant sur le travail de Kouhila & Maarouf (soumis pour publication) comme texte principal et sur les travaux de Giuseppin (1996) et de Patrigeon & Simon (1997) comme textes auxiliaires, fournis aux stagiaires afin de comprendre le texte principal, en le situant dans son contexte de recherche. L'outil présenté ci-dessous (tableau 3) aide l'enseignant à analyser les expériences décrites dans le manuel ou celles qu'il va faire avec ses élèves.

Catégorie de l'expérience	Fonctions de l'expérience
Expérience fondamentale	Induire une loi physique ou introduire un concept fondamental.
Expérience de sensibilisation	Provoquer la motivation de la classe. Poser une nouvelle question.
Expérience illustrative	Illustrer un concept, un phénomène. Mettre en évidence une loi ou un phénomène.
Expérience de référence	Introduire un concept. Présenter un modèle tout fait. Vérifier une loi physique.
Expérience de renforcement	Exploiter un modèle. Renforcer les acquis des élèves.
Expérience qualitative	Proposer une première approche d'un concept.
Expérience assistée	Saisir et traiter automatiquement les mesures.
Expérience-spectacle	Présenter un phénomène pour provoquer l'étonnement.
Expérience prototypique	Introduire plusieurs faits avec une seule monstration.
Expérience « limitative »	Montrer les limites de validité d'un modèle ou d'une loi.
Expérience- manipulation	Se familiariser avec un appareil ou une technique de mesure.
Expérience historique	Enrichir la culture scientifique de l'élève.
Expérience-test	Vérifier une hypothèse formulée par l'élève.
Expérience de TP-problème	Problématiser une situation physique familière.
Expérience de validation	Valider un modèle reconstruit par la classe.
Expérience de « persuasion »	Convaincre l'élève de la plausibilité d'un argument.
Expérience quotidienne	Jeter des ponts entre le cadre quotidien et le cadre physique. Appliquer les lois physiques à des situations familières.

Tableau 3 : Grille d'analyse des expériences décrites dans les manuels d'enseignement

Situation 3 : Les raisonnements canoniques et spontanés dans la physique à enseigner

La situation de formation relative à ce thème a été élaborée en s'appuyant sur les travaux de Robardet (1990), de Guillon (1995), de Viennot (1996) et de Toussaint & Gréa (1996). Au terme de cette situation de formation, une grille d'analyse a été construite (tableaux 4 et 5). Elle permet à l'enseignant de prendre conscience des raisonnements développés dans les manuels d'enseignement et des raisonnements spontanés des élèves.

Raisonnement	Point de départ	Conclusion
Induction	Une expérience	Énonciation d'une loi
Déduction	Une hypothèse, une loi, un principe	Inférence d'un théorème ou autres
Contre-exemple	Une hypothèse	Réfutation par l'expérience ou par un calcul théorique
Analogie	Situation habituelle	Situation nouvelle

Tableau 4 : Les raisonnements formels fréquents dans la physique à enseigner

Raisonnement	Éléments permettant de le caractériser
Circulaire ou tautologique	On élabore une loi avec un appareil dont le principe de fonctionnement repose sur cette loi (fréquent dans les manuels).
Séquentiel	Appréhender un circuit en le dotant d'un point de départ privilégié et d'une règle de progression à partir de celui-ci.
Local	Négliger l'aspect systémique (fréquent en électricité).
Causal simple	Chercher une cause efficiente à un phénomène (la force est la cause du mouvement : il y a un agent et un patient).
Causal linéaire	Constitué d'une chaîne de causalités simples.
Métaphorique	Exemple : la métaphore du fluide pour la chaleur ou le courant.
Naturel	C'est le raisonnement non formel et spontané que l'on trouve chez tout le monde.
Analogique	Usage abusif de l'analogie (fréquent dans la pensée naturelle).
Monotonionnel	Analyse d'une situation physique à l'aide d'un seul concept sans tenir compte des concepts relationnels liés à celui-ci.

Tableau 5 : Les raisonnements spontanés fréquents dans la physique « scolaire »

Situation 4 : Rôle des modèles dans l'enseignement de la physique

La situation de formation a été élaborée en s'appuyant sur les travaux de Walliser (1977), de Robardet (1995), de Robardet & Guillaud (1997), et de Maarouf & Kouhila (à paraître). Cette situation a débouché sur la grille suivante (tableau 6) qui permet d'analyser le statut des modèles et la stratégie de leur « introduction » dans les manuels.

	Typologie	Un exemple illustratif
Modèle scientifique standard	géométrique	propagation rectiligne de la lumière
	structural	mécanismes réactionnels
	mécanique	théorie cinétique des gaz parfaits
	iconique	structure de la matière
	mathématique	modèles quantiques
	analogique	transferts thermiques
	empirique	cinétique chimique
	symbolique	interactions mécaniques
	théorique	thermodynamique
	prescriptif	fréquent en biologie
	descriptif	fréquent en chimie
	simulé	fréquent en mécanique des fluides
	physique	maquette d'un avion
	stochastique	fréquent en physique statistique
explicatif	fréquent en chimie	
d'optimisation	fréquent en énergétique solaire	
Modèle spontané	modèle intuitif	les conceptions, la vie courante

Tableau 6 : Quelques types de modèles en sciences expérimentales

3.4. Proposition d'une fiche épistémologique de synthèse

Nous donnons le résultat de l'analyse faite par les stagiaires (sous la direction du formateur) à propos des concepts physiques, de l'expérience, des modèles et des raisonnements (tableaux 7a, 7b, 7c et 7d). Il s'agit de ce que nous avons appelé « la fiche épistémologique de la leçon ». En effet, nous avons appliqué les grilles des concepts, des expériences, des modèles et des raisonnements (tableaux 2 à 6) aux chapitres 3 et 4 de mécanique du manuel scolaire marocain de physique (Ministère de l'Éducation Nationale, 1994, pp. 22-37) de la 1^{ère} année secondaire scientifique (grade 10). Auparavant, rappelons les objectifs d'enseignement visés à travers les deux chapitres en question :

- définir le système à étudier ;
- classer les différentes forces ;

- faire l’inventaire des forces exercées sur un système ;
- représenter une action mécanique par un vecteur force.

Les intitulés des contenus à enseigner sont :

Chapitre 3 : Actions mécaniques

3.1. Exemples d’actions mécaniques

3.2. Le vecteur force

Chapitre 4 : Autres exemples d’actions mécaniques

4.1. Forces localisées ponctuellement

4.2. Forces de contact réparties

4.3. Forces à distance

3.4.1. Analyse conceptuelle du chapitre intitulé : « Actions mécaniques »

Dénomination	Typologie	Niveau de formulation	Trame conceptuelle
Action mécanique	Concept précurseur	Non défini explicitement dans le manuel.	
Force	Concept formel relationnel	La force modélise l’action mécanique d’un système sur un autre. Elle est définie par ses effets statique et dynamique.	
Force Localisée	Concept formel relationnel	Si la surface de contact S est réduite en un point, on parle de forces localisées.	
Force Répartie	Concept formel Relationnel	On parle de forces réparties si S est non négligeable.	
Force de Frottement	Concept formel relationnel	Si S est rugueuse, on parle de force de frottement.	
Interaction	Concept formel non relationnel	C’est l’action mécanique réciproque entre deux systèmes.	

Tableau 7a : Fiche épistémologique (volet « concepts »)

3.4.2. Analyse des expériences décrites dans le chapitre intitulé : « Actions mécaniques »

En appliquant la grille des expériences (tableau 3) au chapitre 3 intitulé « Actions mécaniques », le groupe classe a obtenu les résultats suivants :

Titre de l'expérience	page	Type d'expérience	Fonction de l'expérience
Locomotive tirant un wagon	22	Expériences quotidiennes de sensibilisation	Mise en évidence de l'effet dynamique d'une force.
Frappe d'une balle de tennis.	23		
Une ampoule suspendue au plafond.	23		Mise en évidence de l'effet statique d'une force.
Un saut à la perche.	23		Mise en évidence des effets statique et dynamique.
Allongement d'un ressort par la main.	24	Expérience qualitative	Approcher qualitativement l'intensité d'une force.
Mesure de l'intensité d'une force.	25	Expérience de référence	Introduire quantitativement un concept formel.
Etalonnage d'un ressort.	30	Expérience fondamentale	Induire la loi $T = k\Delta l$.
Réaction d'un plan sur un corps solide en équilibre.	30	Expérience illustrative	Illustrer la force répartie.
			Modéliser par un vecteur.

Tableau 7b : Fiche épistémologique (volet « expériences »)

3.4.3. Analyse de quelques raisonnements développés dans le manuel scolaire de physique

À l'aide de la grille des raisonnements (tableaux 4 et 5), les stagiaires ont analysé les raisonnements mis en œuvre dans le manuel scolaire en question (tableau 7c).

Type de raisonnement	Page	Point de départ	Conclusion
Inductif	22-23	Plusieurs situations mécaniques familières	Les actions mécaniques ont deux effets : statique et dynamique.
	29	Étalonnage d'un ressort	Élaboration de la loi $T = k\Delta l$.
Causal	23	Le manuel suggère que la force est la cause du mouvement.	
Circulaire ou tautologique	29	Établissement de la loi $T = k\Delta l$ avec un dynamomètre qui repose sur cette même loi.	
Déductif	73	La loi de conservation de la quantité de mouvement	Déplacement d'une fusée vers l'avant.
Contre-exemple	46	Mobile sur un camion en mouvement	Principe d'inertie n'est valable que dans les référentiels galiléens.
Analogie	137	Cascade d'eau	Introduire la tension électrique.

Tableau 7c : Fiche épistémologique (volet « raisonnements »)⁴

3.4.4. Analyse du modèle « Force » présenté dans le manuel de physique

Les résultats de l'analyse du modèle « Force » (Maarouf & Kouhila, à paraître) abordé dans les deux chapitres 3 et 4, sont consignés dans le tableau 7d. Cette analyse a été faite à l'aide de la grille des modèles. Le tableau 7d donne un exemple de fiche épistémologique relative au volet « modèles ».

Type de modèle	Fonctions du modèle	Stratégie de présentation	Description du modèle
Modèle symbolique	Fonction sélective et simplificatrice	Le manuel présente le modèle 'force' tout fait.	<p>1. Le champ empirique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - À l'aide de plusieurs situations, la notion de force est introduite par ses effets statique et dynamique. - Une 1^{ère} catégorisation des forces est fournie : forces localisées et réparties. - Ensuite, une 2^{ème} classification est donnée : forces de contact et à distance. <p>2. Le champ théorique :</p> <p>La force est représentée par un vecteur dont les caractéristiques sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • le point d'application ; <p>Cette représentation suggère les traits de modélisation suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - si la surface de contact S est réduite en un point, on parlera de forces localisées ;
	Fonction d'aide à la représentation	<i>Parce que :</i> les instructions pédagogiques ne préconisent pas la reconstruction du modèle par l'élève	

	<ul style="list-style-type: none"> - si la surface S est non négligeable, on parlera de forces réparties ; - si la surface S est lisse, on négligera les frottements ; - si la surface de contact S est rugueuse, on parlera des forces de frottement. <ul style="list-style-type: none"> • la droite d'action ; • le sens ; • l'intensité.
--	--

Tableau 7d : **Exemple d'analyse d'un modèle tel qu'il est présenté par le manuel scolaire**

4. ÉVALUATION DU MODULE DE FORMATION⁵

Comme nous l'avons signalé, la mise en oeuvre, avec les élèves-professeurs, du module que nous venons de décrire, a duré 28 h entre novembre et janvier 98. Il ne nous était pas possible de l'évaluer en cette période car les stages intensifs de terrain n'avaient pas encore débuté. Ce n'est qu'au mois d'avril que nous avons pu évaluer son impact sur les pratiques d'enseignement de nos stagiaires. Signalons que nous étions, à côté de nos collègues, responsables de l'encadrement de ces stages. L'évaluation de ce module a été faite en deux temps.

4.1. Première phase d'évaluation : lors des stages intensifs au lycée

Cette évaluation a concerné dix stagiaires (promotion 98/99). La période du stage « bloqué » (trois semaines du mois d'avril) correspond, au lycée, à l'enseignement de l'électricité et des réactions acido-basiques en 1^{ère} année secondaire (l'équivalent de la classe de seconde française). Pendant cette période, les cours sont arrêtés à l'ENS. Nous étions chargé (l'auteur) d'encadrer trois stagiaires et avons effectué 18 visites de classe à raison de six visites d'une heure par semaine, soit six heures d'encadrement pour chaque stagiaire.

Nous avons assisté uniquement à des cours d'électricité et de chimie des solutions du programme de la 1^{ère} année secondaire. Ces visites de classe montrent que le module proposé n'est pas resté une simple expérience ponctuelle. Au contraire, il a eu un impact positif sur les pratiques d'enseignement des stagiaires qui étaient sous notre tutelle. En effet, ces stagiaires ont préparé leurs fiches épistémologiques avant de venir en classe. Que ce soit dans la pratique de la classe ou lors du débat qui s'ensuit,

nous avons constaté que les stagiaires se posent des questions sur les concepts, les modèles et les expériences qu'ils réalisent, qu'ils essaient d'exploiter les réponses fausses fournies par leurs élèves pour comprendre les raisonnements sous-jacents en leur demandant d'explicitier d'avantage ces réponses.

4.2. Deuxième phase d'évaluation : à la fin de l'année de formation

Le pourcentage de réussite de nos stagiaires à l'examen de sortie fut de 100 %, comme les années précédentes. Après l'affichage des résultats, nous avons jugé le moment opportun pour faire passer un test d'évaluation et recueillir les points de vue des formés sur le module 1. À cette période, les stagiaires ne sont soumis à aucune contrainte et peuvent délivrer en toute liberté leurs opinions sur la formation. Nous avons chargé un autre formateur de faire passer ce test afin d'éviter, sur les réponses, l'influence du didacticien qui a assuré la formation. Pendant une heure, les stagiaires devaient répondre, sur des feuilles supplémentaires, à huit questions ouvertes (annexe 4). L'analyse des réponses⁶ délivrées permet de noter les points suivants :

- la quasi-totalité des stagiaires (9/10) a apprécié favorablement les thèmes abordés dans le module sur l'épistémologie de la physique, ainsi que la stratégie de formation suivie ;

- certains (7/10) ont avancé que ce module leur a permis de repenser leurs propres savoirs en remettant en question la « physique » qu'ils ont apprise à l'université ;

- d'autres (5/10) disent que ce module leur a permis « *d'interroger leurs conceptions sur ce qu'est un concept en physique, un modèle, une expérience* » ;

- pour d'autres (3/10), ce module leur a permis « *d'apprendre à réfléchir, avant, pendant et après leur pratique de la classe* » ;

- la moitié des stagiaires (5/10) affirme que ce module leur a appris à se méfier de la physique du manuel scolaire qui peut être parfois « *erroné à cause de la transposition didactique* », selon leurs propres termes ;

- ils ont tous (9/10) noté que la fiche épistémologique constitue un noyau dur ou un socle sur lequel devrait s'appuyer la préparation des activités d'enseignement. Pour certains stagiaires (4/10), « *la fiche épistémologique donne un nouveau regard sur la physique à enseigner* ».

– néanmoins, trois stagiaires sur dix pensent que la préparation de la fiche épistémologique est « *une corvée de plus à côté de la fiche pédagogique* ». Ils ont proposé que la fiche épistémologique soit préparée de façon collective par un groupe d'enseignants pour confronter leurs conceptions et améliorer par la même occasion les grilles proposées. Selon leurs propos : « *la fiche de préparation collective ne doit pas rester figée et doit s'améliorer au fil des années* ».

5. CONCLUSION

Nous avons soulevé, dans le présent article, le problème de l'articulation entre les formations théorique et professionnelle dans les Écoles Normales Supérieures marocaines. Nous avons décrit un dispositif de formation ayant pour objectif d'aider l'enseignant à acquérir une autonomie vis-à-vis des savoirs à enseigner. Il s'agit d'une initiation à l'analyse épistémologique qui permet au professeur de prendre du recul par rapport à la physique à enseigner, en la repensant, en la décortiquant et en la critiquant en permanence (Mathy, 1997 ; Maarouf & Kouhila, soumis pour publication). Ainsi, nous avons fait de l'épistémologie et de la didactique de la physique des outils de formation en plus d'objets de connaissance.

Les grilles que nous avons construites avec nos stagiaires ont l'avantage de s'appliquer à tous les manuels de physique du secondaire car elles ont été élaborées en s'appuyant sur le fonctionnement de la physique. Il faut noter que les fiches pédagogique et épistémologique d'une leçon ne s'excluent pas, mais plutôt se complètent.

Les outils proposés pourraient éventuellement être transposables à d'autres disciplines expérimentales, en faisant, bien sûr, les réajustements nécessaires, compte tenu de la spécificité épistémologique de chaque discipline.

Pour que la didactique puisse attirer les enseignants, nous pensons qu'il serait souhaitable que les chercheurs en didactique leur proposent des outils opérationnels souples qui permettraient de jeter des éclairages sur l'action didactique en vue de l'analyser, voire de l'améliorer sans toutefois édicter des modèles pédagogiques tout prêts.

Lors de notre encadrement du stage « bloqué » du mois d'avril, nous avons constaté que les pratiques d'enseignement des stagiaires qui étaient sous notre tutelle témoignent de l'impact du module d'épistémologie. En effet, nos visites de classe et les résultats du questionnaire montrent que nos stagiaires ont acquis une vigilance épistémologique qui leur permet de porter un regard critique sur « la physique des manuels scolaires » et

par suite de réfléchir sur les concepts « méta-théoriques » véhiculés par l'enseignement. En plus, les réponses fournies aux tests d'évaluation montrent que les objectifs de formation visés par ce module ont été atteints.

NOTES

1. L'École Normale Supérieure (ENS) est un centre marocain de formation des professeurs de lycée qui recrute sur concours écrit et oral (après une présélection sur dossier) des étudiants titulaires d'une maîtrise pour suivre un cycle de formation pédagogique d'une année (cinquième année).

2. Il faut noter que ce programme diffère légèrement du programme officiel qui émane du ministère. En effet, les contenus et la mise en œuvre de ce programme sont remis en question chaque année par les formateurs en vue d'améliorer la formation en tenant compte des apports constamment renouvelés de la recherche en didactique.

3. La 1^{ère} colonne du tableau 1 rassemble les mots clefs des thèmes du module 1 (annexe 2).

4. Pour être exhaustif, le tableau 7c contient d'autres raisonnements développés dans les autres chapitres du manuel.

5. Les autres collègues ont passé un autre test pour évaluer la formation en entier. Nous nous contentons ici de présenter les résultats qui concernent l'évaluation du module 1.

6. Puisque le nombre de stagiaires est limité, nous ne disposons pas d'une variété de réponses pour les catégoriser.

BIBLIOGRAPHIE

- ASTOLFI J.-P. & DEVELAY M. (1989). *La didactique des sciences*. PUF.
- ASTOLFI J.-P., DAROT E., GINSBURGER-VOGEL Y. & TOUSSAINT J. (1997a). *Pratiques de formation en didactique des sciences*. Bruxelles, De Boeck.
- ASTOLFI J.-P., DAROT E., GINSBURGER-VOGEL Y. & TOUSSAINT J. (1997b). *Mots-clés de la didactique des sciences*. Bruxelles, De Boeck.
- BEAUFILS D. (1995). Enseignement de science expérimentale : questions de vigilances. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol. 89, n° 776, pp. 1283-1294.
- GUILLON A. (1995). Démarches scientifiques en travaux pratiques de physique de DEUG à l'université de Cergy- Pontoise. *Didaskalia*, n° 7, pp. 113- 127.
- GIUSEPPIN M. (1996). Place des activités expérimentales en sciences physiques. *Didaskalia*, n° 9, pp. 107-118.

- JACOBI D. (1993). Les terminologies scientifiques et leur devenir dans les textes de vulgarisation scientifique. *Didaskalia*, n° 1, pp. 69-83.
- JOHSUA S. & DUPIN J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris, PUF.
- KOUHILA M. (1998a). Les problèmes langagiers et conceptuels posés par la terminologie utilisée dans l'enseignement des sciences physiques. *Bulletin n° 12, Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech*, Marrakech, Publication du GDSM, pp. 17-22.
- KOUHILA M. & MAAROUF A. (soumis pour publication). Approche épistémologique et didactique des fonctions de l'expérience dans la physique savante et scolaire. *Didaskalia*.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1993). *Construire des concepts en Physique*. Paris, Hachette.
- MAAROUF A. & KOUHILA M. (à paraître). La dynamique élémentaire dans l'enseignement fondamental marocain : difficultés d'apprentissage et apport des activités de modélisation dans la construction de la notion de force. *Didaskalia*.
- MAAROUF A. & KOUHILA M. (soumis pour publication). Représentations des futurs enseignants de l'ENS de Marrakech à propos de la nature des sciences physiques, de son apprentissage et de son enseignement : Éléments d'évaluation d'une formation initiale en didactique et en épistémologie de la physique. *Aster*.
- MATHY P. (1997). *Donner du sens aux cours de sciences, des outils pour la formation éthique et épistémologique des enseignants*. Bruxelles, De Boeck.
- MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1994). *Physique, 1ère année secondaire*. Casablanca, Éditions Almadariss.
- MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1996a). *Le curriculum des sciences physiques dans l'enseignement secondaire*. Rabat, Éditions Almaârif Aljadida.
- MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1996b). *Guide pédagogique des expériences de physique-chimie programmées au secondaire*. Rabat, Éditions Almaârif Aljadida.
- PATRIGEON F. & SIMON C. (1997). Les répercussions d'une évaluation des capacités expérimentales dans les pratiques de l'enseignement des sciences physiques. *Didaskalia*, n° 11, pp. 163-176.
- ROBARDET G. (1990). Enseigner les sciences physiques à partir des situations-problèmes. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 720, pp. 17-28.
- ROBARDET G. (1995). Situations-problèmes et modélisation ; l'enseignement en lycée d'un modèle newtonien de la mécanique. *Didaskalia*, n° 7, pp.129- 143.
- ROBARDET G. & GUILLAUD J.-C. (1997). *Éléments de didactique des sciences physiques*. Paris, PUF.
- SAINT-GEORGES M. & BONNEFOIS P. (1998). Analyse de pratiques et didactique : propositions pour une formation des professeurs de sciences physiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol. 92, n° 805, pp. 997-1009.
- TOUSSAINT J. & GRÉA J. (1996). Construire des concepts et mettre en œuvre des raisonnements. In J. TOUSSAINT (Coord.), *Didactique appliquée de la physique-chimie*. Paris, Nathan, pp. 87-114.
- VIENNOT L. (1996). *Raisonnement en Physique, la part du sens commun*. Bruxelles, De Boeck.
- VIENNOT L. (1997). Former en didactique, former sur le contenu ? Principe d'élaboration et éléments d'évaluation d'une formation en didactique de la physique en deuxième année d'IUFM. *Didaskalia*, n° 10, pp. 75-93.
- WALLISER B. (1977). *Systèmes et modèles*. Paris, Seuil.

REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre profonde gratitude à Andrée Tiberghien et à Bernadette Pateyron pour leur soutien moral et pour leurs remarques pertinentes.

ANNEXE 1

Royaume du Maroc
 Ministère chargé de l'Enseignement Secondaire et Technique
 Académie de Marrakech
 Inspectorat des Sciences Physiques

Titre de la leçon : Durée : Classe :

Contenu	Connaissances déclaratives (capacité A ₁)	Savoir-faire (capacité A ₂)	Activité du professeur	Activité de l'élève	Les outils didactiques	Évaluation
Titres des paragraphes	- définition	<i>Appliquer :</i>	- réalise expérience	- écoute	- tableau noir	- questions orales
	- énoncé d'un théorème	- règle - formule ; - théorème - principe.	- explique	- prend des notes	- dispositif expérimental	- questions écrites
	- énoncé d'une loi	<i>Exploiter :</i>	- interprète	- répond à question	rétroprojecteur enregistrement	- exercice d'application
	- énoncé d'un principe	- résultats de l'expérience	- expose	- réalise montage	- fiche de l'expérience	- problème de synthèse
	- relation, formule	- graphique	- donne directives	- relève mesures	- manuel scolaire	- devoir à la maison
	- symbole, unité - propriété	<i>tracer</i> une courbe	- interroge	- utilise un manuel	- autres - -	- devoir surveillé
	- caractéristique	<i>Manipuler</i> un appareil de mesure	- oriente	- observe		- - -
	- convention	<i>Réaliser</i> un montage	-	- pose des questions		
	- nomenclature	-	-	- déduit relation		
	- règle	-				
	-					
		À préciser en fonction des objectifs de référence	La stratégie du déroulement de la leçon est à élaborer par le professeur			

Tableau 8 : Fiche pédagogique de préparation d'une leçon

Remarque : nous donnons ici la traduction française de la fiche pédagogique telle qu'elle nous a été remise par un professeur en exercice dans un lycée de Marrakech.

ANNEXE 2

Programme de formation théorique et professionnelle en didactique et en épistémologie des sciences physiques adopté par les formateurs pour l'année 98-99 (section PC₅)

I – Formation théorique (100 h par an)

Introduction à la didactique et à l'épistémologie des sciences physiques (2 h)

***Module 1 : Épistémologie de la physique* (28 h)**

Thème 0 : Comment se forme une connaissance scientifique ?

Thème 1 : La *conceptualisation* en sciences physiques .

Thème 2 : Le rôle de l'*expérimentation* en sciences physiques.

Thème 3 : Les modes de *raisonnements* en sciences physiques.

Thème 4 : Le statut des modèles et de la *modélisation* en physique.

Thème 5 : *La formalisation mathématique* en physique : analyse des rapports de la physique avec les mathématiques.

***Module 2 : Planification et évaluation de l'enseignement* (30 h)**

1 – Finalités de l'enseignement des sciences.

2 – Analyse des objectifs de l'enseignement des sciences physiques.

3 – Étude des programmes et des orientations pédagogiques.

4 – Les modèles pédagogiques.

5 – Évaluation de l'enseignement.

***Module 3 : Les concepts fondamentaux de la didactique des sciences* (40 h)**

1 – Les conceptions et le changement conceptuel

2 – Approche historique et analyse des erreurs

3 – La transposition didactique

4 – Le contrat didactique

5 – Les activités de modélisation dans l'enseignement de la physique au lycée

II – Stages d'initiation aux pratiques professionnelles (8 h par semaine)

1° Phase : Observation de la classe

Durée : Une semaine de novembre à raison de deux demi-journées par semaine.

2° Phase : Micro-enseignement

Durée : trois semaines de novembre et le mois de février à raison de deux demi-journées par semaine.

3° Phase : Prise de responsabilité d'une leçon

Durée : mois de décembre, janvier et mars à raison de quatre heures par semaine.

4° Phase : Prise de responsabilité d'une classe

Durée : stages intensifs durant trois semaines du mois d'avril.

III – Application des nouvelles technologies à l'enseignement de la physique (8 h)

ANNEXE 3

Compétences à développer chez un enseignant stagiaire de sciences physiques

I – Compétences épistémologiques et disciplinaires :

- ***Compétence n° 1 : Acquisition des concepts clés de la discipline***
 - Approfondir les concepts fondamentaux à enseigner.
 - Apprendre à justifier l'appellation de certains termes (moment, quantité de mouvement..).

– Apprendre à distinguer le sens usuel et le sens conventionnel d'un terme scientifique.

– Exploiter l'histoire des concepts dans l'analyse des erreurs des élèves.

– Apprendre à élaborer le réseau conceptuel d'une leçon.

- ***Compétence n° 2 : Maîtrise du rôle de l'expérience dans le contexte scolaire***

– Apprendre à analyser l'expérience dans le contexte scolaire.

– Apprendre à pratiquer une démarche expérimentale.

- ***Compétence n° 3 : Maîtrise du statut des modèles dans la physique scolaire***

– Apprendre à décrire les modèles présentés dans les manuels d'enseignement.

– Apprendre à analyser les fonctions des modèles dans le contexte scolaire.

– Apprendre à distinguer entre le 'réel' et sa modélisation.

- ***Compétence n° 4 : Maîtrise de la nature du formalisme mathématique***

– Prendre conscience de la nature des rapports entre la physique et les mathématiques.

– Savoir transposer les 'outils' mathématiques nécessaires à la modélisation.

II – Compétences transversales :

- ***Compétence n° 1 : Lecture d'un texte scientifique***

– Apprendre à analyser et à exploiter un manuel scolaire.

– Apprendre à tirer profit d'un document scientifique.

- ***Compétence n° 2 : Maîtrise du langage graphique***

– Apprendre à représenter un phénomène, une situation expérimentale.

– Acquérir les règles et les conventions sous-jacentes à la schématisation.

– Maîtriser la polysémie et la nature diversifiée des codes graphiques.

III- Compétences langagières :

- **Compétence n° 1 : Production d'un écrit à caractère scientifique**
 - Apprendre à rédiger le compte rendu d'un travail expérimental.
 - Apprendre à rédiger la solution à une question ou à un problème.
 - Apprendre à rédiger un rapport de recherche (un mémoire par exemple).
- **Compétence n° 2 : Communication verbale**
 - Apprendre à présenter les résultats d'un travail de recherche.

IV – Compétences didactiques :

- **Compétence n° 1 : Conceptualisation d'une notion ou d'une situation**
 - Apprendre à conceptualiser en s'appuyant sur une situation familière ou artificielle.
 - Apprendre à analyser les situations d'enseignement à l'aide des concepts de la didactique.
- **Compétence n° 2 : L'étonnement et la sensibilisation**
 - Savoir provoquer un étonnement à l'aide d'une expérience ou d'un fait quotidien.
 - Savoir éveiller l'intérêt des élèves pour le sujet traité en classe.
- **Compétence n° 3 : Le questionnement et la problématisation**
 - Apprendre à poser des problèmes et à déclencher un questionnement chez l'élève.
 - Apprendre à reformuler une question ou un problème à l'aide de questions variées.
- **Compétence n° 4 : Exploitation d'un modèle et exemplification**

V – Compétences méthodologiques :

- **Compétence n° 1 : Développement d'attitudes scientifiques**

Il s'agit de développer chez le stagiaire les attitudes suivantes :

- Attitude d'écoute
- Suspension des jugements
- Curiosité
- Aptitude à relativiser sa pensée
- Aptitude à hypothéquer
- Pensée explicite
- Esprit d'analyse fine
- Honnêteté intellectuelle
- Esprit critique
- Ouverture d'esprit
- Attitude réflexive
- Attitude de réserve, esprit de synthèse...

- **Compétence n° 2 : Maîtrise des démarches et des raisonnements**

- Apprendre à pratiquer une démarche de modélisation
- Maîtriser les raisonnements formels : induction, déduction...
- Prendre conscience des raisonnements spontanés des élèves.

- **Compétence n° 3 : La réflexion métacognitive**

Apprendre à prendre du recul par rapport à son savoir et par rapport aux savoirs à enseigner en les repensant en permanence.

ANNEXE 4

Questionnaire d'évaluation du module d'épistémologie

Ce questionnaire n'est ni un contrôle de connaissances ni un examen. D'ailleurs, ce document restera anonyme. Il s'agit d'une enquête qui vise à connaître vos opinions, vos appréciations et vos suggestions à propos du module intitulé « épistémologie de la physique ». Veuillez répondre en toute liberté et en toute franchise.

1. Donnez votre appréciation globale sur le module 1 d'épistémologie de la physique.

.....
.....
.....

2. En quoi ce module de formation vous a-t-il été bénéfique ? Ce type de formation correspond-il à vos attentes ?

.....
.....
.....

3. Quelles difficultés avez-vous éprouvées lors de l'exploitation des grilles d'analyse élaborées lors des quatre situations de formation que vous avez suivies ?

.....
.....
.....

4. À quel point les outils théoriques proposés dans le module 1 sont-ils exploitables dans la pratique de la classe ?

.....
.....
.....

5. À quel point les six thèmes traités dans le module 1 ont-ils contribué à votre préparation et à votre habilitation au métier de l'enseignement ?

.....
.....
.....

6. En quoi la stratégie de formation suivie dans ce module a-t-elle attiré votre attention et a-t-elle suscité votre intérêt ?

.....

.....
.....
.....

7. Avez-vous senti qu'il y a une certaine articulation entre la pratique professionnelle au lycée lors des stages et la formation proposée dans le module 1 ?

.....
.....
.....

8. Exprimez vos critiques, vos évaluations et vos suggestions pour améliorer les contenus et la stratégie de formation proposés dans le module 1.

.....
.....

Cet article a été reçu le 19/01/1999 et accepté le 6/05/2000.

NOTES DE LECTURE

BOOK REVIEWS

ASTOLFI J.-P., PETERFALVI B., VERIN A. (1998). *Comment les enfants apprennent les sciences ?* Paris, Retz Pédagogie, 267 p.

L'ouvrage comprend cinq chapitres organisés autour de questions qui sont, pour les auteurs, essentielles à la qualité des enseignements scientifiques et un dernier chapitre consacré à Victor Host. Les auteurs, à l'aide des extraits cités souhaitent ainsi rendre hommage à Victor Host, ce qui est réussi. Dans la suite, nous ne parlerons pas de ce dernier chapitre.

Ce livre est intitulé « *Comment les enfants apprennent les sciences* », il aurait sans doute fallu ajouter « en classe », puisque le rôle du maître occupe dans ce livre une place extrêmement importante.

Les cinq premiers chapitres concernent la communication dans la classe et ses pièges, les représentations et les obstacles aux apprentissages scientifiques, les démarches scientifiques et la formation scientifique, l'écriture et le graphisme en science et enfin la construction et la structuration du savoir scientifique. Chacun de ces cinq chapitres est organisé de façon similaire : une première partie intitulée « *Clés pour l'analyse didactique* » qui fait état des recherches sur le sujet, une deuxième partie « *Exemples à la loupe* » qui s'appuie sur des situations d'enseignement vécues et enfin une troisième partie « *Repères pour la classe* » qui essaie de définir de façon opérationnelle les retombées des recherches sur l'enseignement. Enfin, à la fin de chaque chapitre se trouve « une fiche » qui résume en quelques pages l'essentiel du chapitre. Cette construction est intéressante et donne envie de lire ce livre. Par ailleurs, chaque chapitre débute par une question (« la question en débat ») qui, en principe, est traitée durant tout le chapitre.

À la lecture, on s'aperçoit que, malgré cette structure, les différents chapitres sont inhomogènes, les deux derniers étant, à mon avis, très différents des trois premiers.

Dans les deux derniers chapitres, on trouve des exemples qui illustrent bien ce qui est annoncé au début de chacun, ce qui n'est pas le cas des trois premiers. Par ailleurs, on est frappé dans ces trois premiers chapitres par un excès de langage de spécialiste (du jargon diront certains). En quoi est-ce éclairant pour le lecteur novice et non chercheur d'entendre parler de tension didactique, de conduite dialogale et non dialogique, d'épisodes inducteurs, médiateurs... ? En quoi cela va-t-il être directement utile au maître pour enseigner des sciences ? Il y a bien sûr un glossaire en fin de livre, ce qui permet parfois de s'y retrouver, mais pas toujours. Dans l'un de ces chapitres, les auteurs parlent de « carte conceptuelle », sans donner aucun exemple qui montrerait l'intérêt pour l'enseignant de faire de telles cartes, c'est vraiment dommage. Le lecteur est un peu assommé par la quantité de « mots inhabituels », y compris dans la partie « *Repères pour la classe* ». Et pourtant, ces chapitres mentionnent des aspects importants des résultats de la didactique, comme « *l'attitude d'écoute des conceptions constitue le socle nécessaire pour effectuer un pas de plus : s'efforcer de mieux les comprendre et rechercher le sens que leur donnent les élèves* », ou encore « *apprendre ce n'est pas seulement augmenter son stock de savoirs, c'est aussi, et peut être même d'abord, transformer ses façons de penser le monde* », ou encore « *n'oublions pas à cet égard, les fréquents malentendus entre professeur et élèves, dans la mesure où le modèle fonctionne souvent chez l'expert comme une seconde nature et lui semble relever du domaine du référent, alors que les élèves n'y*

accèdent pas encore ». Pourquoi, ne pas être resté avec un langage toujours aussi simple ?

À l'inverse, les deux derniers chapitres sont beaucoup plus pragmatiques et écrits en langage beaucoup plus naturel et sont donc plus compréhensibles. De plus, de nombreux exemples illustrent les idées introduites et permettent au lecteur de ne pas perdre le fil et de se faire une idée plus précise de ce qui est abordé, que ce soit au niveau de l'écrit (les exemples sont nombreux) qu'au niveau du dernier chapitre où est donné un exemple très parlant et illustratif d'une séquence en électricité.

Il me semble que ce livre part d'une bonne intention, mais que les auteurs ont oublié que, tout d'abord, ce n'est pas en lisant des définitions de concepts qu'on les utilise et qu'enfin, on n'utilise des concepts que lorsqu'on en sent la nécessité. S'il est naturel que des chercheurs en didactique définissent et utilisent des concepts dans leur travail de chercheur, le but n'est pas d'apprendre aux enseignants les noms de ces concepts. Les auteurs savent bien qu'en sciences il ne suffit pas d'apprendre la définition d'un concept pour être à même de l'utiliser de façon pertinente. Il ne s'agit pas d'apprendre des définitions aux enseignants, encore faut-il arriver à leur faire percevoir les propriétés de ces concepts ainsi que leurs caractéristiques et surtout ce qu'ils peuvent, dans leur quotidien d'enseignant, leur apporter. Ce livre réussit parfois, mais échoue aussi. Par ailleurs, laisser penser à des formateurs qu'il faut, dans le cadre de leur enseignement à l'IUFM ou dans des circonscriptions, utiliser ce langage est, je le crains, une erreur.

Qu'on ne se méprenne pas, je trouve extrêmement important un certain nombre de concepts de didactique, mais il me paraît plus important encore que les enseignants en viennent à faire, comme monsieur Jourdain, des cours qui mettent en application bon nombre de ces concepts didactiques. Là encore, faut-il encore être à même de leur montrer, à l'aide d'exemples concrets, comment ces concepts peuvent les amener à modifier leurs pratiques enseignantes.

E. Saltiel

CHARLIER B., CHARLIER E. (1998). *La formation, au cœur de la pratique. Analyse d'une formation continuée d'enseignants*. Bruxelles-Paris, De Boeck Université – Pratiques pédagogiques, 133 p.

Cet ouvrage s'adresse aux formateurs d'enseignants. Pour les auteurs, la professionnalisation de l'enseignement et l'innovation reposent sur l'articulation entre la formation continuée et la pratique pédagogique.

L'ouvrage est construit autour de l'analyse d'une recherche-action-formation. Il comporte trois parties.

La première aborde le cadre théorique et tente de répondre aux questions suivantes.

Qu'est ce qu'enseigner ? La réponse à cette question repose sur un modèle de l'enseignant à former. Pour les auteurs, l'enseignant est un décideur qui résout des problèmes.

Quelles sont les connaissances acquises par les enseignants et comment sont-elles apprises ? Pour les auteurs, les enseignants apprennent des connaissances contextualisées, spéculatives, instrumentales, des schèmes d'action et des routines. Cet apprentissage se réalise par la réflexion, l'action et l'interaction

Qui sont les enseignants en formation continuée ? Ils ont une histoire, sont confrontés aux impératifs de l'action professionnelle (c'est-à-dire, ont souvent des demandes de « solution immédiate »), vivent dans un groupe social par rapport auquel ils doivent se définir et partager les valeurs et sont responsables de leurs actes.

Dans la deuxième partie de l'ouvrage, les auteurs décrivent une recherche-action-formation. La formation s'adresse à neuf instituteurs et porte sur la conception d'environnements pédagogiques intégrant l'ordinateur. Elle a été mise en place en respectant les options théoriques exprimées dans la première partie et les demandes des enseignants : améliorer des compétences en informatique, construire un produit innovant, utilisable dans les classes et vivre une

expérience de formation en groupe qui pourrait déboucher sur un réseau d'échange. Le travail des formatrices était articulé autour de cinq options :

- l'explicitation des apprentissages réalisés,
- l'explicitation et la confrontation de pratiques,
- l'apport de savoirs et de techniques,
- la liaison entre la pratique professionnelle et l'objet de formation,
- une alternance entre la théorie et la pratique.

Des modalités que les auteurs jugent spécifiques à la démarche recherche-action-formation sont citées :

- la construction de savoirs sur la base d'une théorisation de pratiques de formation et d'action,
- la centration sur l'étude des processus plutôt que sur les résultats,
- la construction de savoirs dans l'intersubjectivité,
- l'accès et le traitement d'une grande diversité d'informations,
- la position du chercheur comme analyste d'une pratique dans laquelle il est impliqué,
- l'implication des acteurs dans la recherche,
- la construction interactive des différentes facettes : recherche, action, formation.

La troisième partie de l'ouvrage est consacrée à la façon dont les enseignants ont vécu l'articulation entre formation et pratique au cours de la formation. Des conceptions construites par les enseignants à propos de leur apprentissage sont décrites.

En conclusion, les auteurs proposent des conditions favorables à l'articulation de la formation à la pratique des enseignants :

- une formation organisée autour d'un projet de groupe,
- un environnement de formation ouvert,
- une formation intégrée dans le parcours professionnel,
- une formation articulée au projet pédagogique de l'institution,
- une formation tenant compte des différences individuelles,

- un rôle à prendre en charge : la gestion de l'environnement de formation.

Les différents points de vue abordés dans cet ouvrage sont intéressants. Je regrette cependant que leur description reste trop générale et apparaisse trop peu contextualisée. Lorsque les auteurs parlent de la construction de savoirs comme d'une des modalités qu'elles jugent spécifiques à la démarche recherche-action-formation, par exemple, de quels savoirs s'agit-il concrètement dans la démarche qui a été mise en place avec les enseignants ? Lorsque l'on parle d'environnement pédagogique intégrant l'ordinateur, ou d'innovation présente dans les dispositifs, de quoi s'agit-il ? En d'autres termes, il me semble que la définition des concepts et modèles utilisés dans un tel dispositif ne suffit pas pour favoriser les transferts des résultats de cette recherche-action-formation dans d'autres démarches semblables.

C. Vander Borgh

JACOBI D. (1999). *La communication scientifique : discours, figures, modèles*. Grenoble, Presses Universitaires de Grenoble, collection « communication, médias et sociétés », 277 p.

Daniel Jacobi est de ceux qui ont construit le champ de recherches sur la communication scientifique et ses travaux sont déjà connus par plusieurs ouvrages, publiés seuls ou en collaboration.

Ce livre offre pourtant une vue renouvelée, car plus riche, sur les travaux multiples consacrés par ce chercheur aux formes les plus diverses de la communication scientifique. Il manifeste de façon particulièrement visible la multiplicité des perspectives qu'il a tracées et aussi la complexité et l'intérêt des objets auxquels il s'est consacré. Cela mérite d'autant plus d'être souligné que la forme retenue, rassemblant une série de textes publiés dans des contextes divers, aurait pu aboutir à un recueil morcelé, ou répétitif. Sans doute le souci de mettre en « perspective cavalière » ces études, de les traiter comme les exemples concrets d'un champ problématique pris dans

son ensemble, et le choix très équilibré fait par l'auteur y sont-ils pour quelque chose. Mais l'essentiel est que, ne répétant pas une théorie unique, répugnant à toute généralisation précipitée et ne se perdant pas davantage dans l'érudition myope, la pensée de Daniel Jacobi est à l'aise dans le genre du recueil, où chaque étude prend la mesure d'une dimension de l'objet.

Daniel Jacobi insiste beaucoup sur la méthode (le fonds conceptuel des sciences du langage, l'attention portée à la sélection des corpus) ; malgré tout, cette méthode se rattache à une rigueur libre, et les outils d'observation des textes ne précèdent ni ne régissent jamais la lecture qui en est faite. On le comprend bien par exemple dans la critique, mesurée mais ferme, que l'auteur adresse à ceux qui n'analysent que les microstructures, prenant le texte par fragments épars. D'où une diversité des approches et une intelligence des textes qui va plus loin que le souci méthodologique de son auteur, et ne manque pas, pour le meilleur, de s'en affranchir un peu : lorsque le commentaire d'un texte unique permet de suivre de façon fine les jeux de l'argumentation, de la narrativité et de l'explication ; lorsque la méditation sur une image (une tête transformée en globe terrestre, le souvenir d'enfance des croquis de Tom Tit, la représentation romancée d'un homme primitif) ouvre des associations et des perspectives décapantes et profondes, par rapport à l'étude du « rendement » didactique des images ; lorsque l'effort pour étudier l'ordonnement des séries de reformulations (dans la pure tradition de l'analyse du « discours de vulgarisation ») fonctionne au bénéfice de la mise en évidence des ruses du texte.

C'est que la problématique centrale qui guide le travail de Daniel Jacobi est en même temps celle qui autorise la prise en compte de l'hétérogénéité, qui exige la nuance et la contradiction, qui appelle la pluralité des points de vue de lecture. L'auteur ne croit pas à l'existence d'une réalité cohérente qu'on pourrait nommer : « Communication scientifique ». Sans doute, son itinéraire (biologiste, didacticien, sémiologue) l'a-t-il mieux prévenu que d'autres contre toute conception faussement unitaire de la science,

de la communication scientifique, du langage scientifique. Ces conceptions, Daniel Jacobi les déconstruit ; son tour favori est la démonstration par l'absurde, qui consiste à étudier systématiquement les moyens de généraliser, pour constater l'impossibilité de le faire.

La communication scientifique est prise dans des circuits, des enjeux, des processus complexes de transformation. Elle est marquée par des exigences contradictoires, avec lesquelles elle peut jouer de bien des façons. Elle est habitée par des créations constantes, qui ne sont jamais seulement les reformulations d'un savoir défini, mais qui puisent dans l'ensemble d'une culture (du texte, de l'image, de leurs rapports) et construisent ainsi des relations subtiles avec plusieurs lectorats.

Sans doute une détermination majeure est-elle suggérée : celle qui fait, contre le « grand partage » entre science et vulgarisation, de la communication scientifique, sous toutes ses formes, une fonction essentielle à la survie de la cité scientifique elle-même et de ses supports un lieu de pouvoir pour les scientifiques. Mais les très nombreuses sources culturelles du travail d'écriture, d'édition, d'illustration, ne sont jamais ramenées, ni à la maîtrise d'un acteur, ni même à une lecture purement stratégique. Finalement, la reconnaissance des tensions qui traversent l'activité de communication sur les sciences, et l'attitude d'exploration constante de ces tensions, est ce qui fait que la lecture de chaque nouvel article de Daniel Jacobi produit un effet de familiarité et un effet de surprise à la fois.

Y. Jeanneret

JONNAERT P., VANDER BORGHT C., (1999). *Créer des conditions d'apprentissage – Un cadre de référence socioconstructiviste pour une formation didactique des enseignants. Paris-Bruxelles, De Boeck Université, 431 p.*

Le gros livre que nous proposons Philippe Jonnaert et Cécile Vander Borght est avant tout un guide pratique pour « une » formation didactique des enseignants, avec de très

nombreux exemples. C'est aussi une synthèse théorique, appuyée sur une bibliographie de 364 références, argumentant un « cadre de référence ».

Ces deux visées, pratique et théorique, se retrouvent dans le schéma général comme dans le plan de chacun des 6 chapitres. À chaque fois, les auteurs explicitent et situent leurs préoccupations, leurs postures épistémologiques et pédagogiques, leurs idées directrices.

Dès le premier chapitre (« *Mise en perspective socioconstructiviste* »), ils exposent le *paradigme socioconstructiviste et interactif* (SCI) à l'intérieur duquel s'inscrit la réflexion développée par le livre « Trois dimensions solidaires définissent le processus de construction des connaissances : (1) la dimension *constructiviste*, (2) la dimension liée aux *interactions sociales*, (3) la dimension liée aux *interactions avec l'environnement* ».

Dans un second temps (« ... à propos du concept de didactique »), ils donnent et confrontent définitions de la didactique ou des didactiques dans la littérature et images que s'en font universitaires et praticiens. Deux idées sont alors avancées :

1) Les objets principaux de toute didactique se trouvent dans la relation didactique et ses composantes.

2) Le concept de rapport au savoir est « l'élément identitaire des didactiques et des disciplines ».

Le chapitre 3 (« *Lorsqu'il est question d'environnement scolaire...* ») veut « localiser » la relation didactique parmi les niveaux organisationnels du système scolaire, « *cadre général dans lequel fonctionne cette relation* ». Il s'intéresse aussi aux relations entre finalités et buts, actions et acteurs, sens des apprentissages.

Il s'agit alors (« vous avez dit contrat didactique ») d'examiner le concept de contrat didactique : quelles en sont les caractéristiques ? À quoi sert-il ? Comment le contrat didactique peut-il assurer le dynamisme de la relation didactique ? Pour les auteurs, il s'agit d'ailleurs plutôt, paradoxalement, d'un « anti-contrat », voire d'un « non-contrat » ; ils le considèrent cependant comme le

« *principal moteur de la relation didactique* » et cherchent donc à en fournir une grille d'analyse.

Le chapitre 5 (« *Le concept d'apprentissage scolaire* ») « *opérationnalise la définition de l'apprentissage* », et explicite la description du processus d'enseignement-apprentissage dans le cadre de référence « *socioconstructiviste et interactif* » grâce à un ensemble de schémas graphiques et de grilles d'analyse utilisées en formation.

Le dernier chapitre, de loin le plus étendu, « *Les conditions de l'apprentissage en contexte scolaire* » reprend l'analyse des processus d'enseignement/apprentissage en détaillant le rôle de chacun (enseignant, élève), présente les résultats d'un travail avec des enseignants en activité sur la conception socioconstructiviste et interactive de l'apprentissage, et surtout détaille, en une centaine de pages nourries d'illustrations et de commentaires, les « *conditions de l'apprentissage en contexte scolaire* ». Il n'est pas inutile de donner ces conditions, attachées aux « *trois phases de l'activité de l'enseignement* » :

– phase pré-active

formulation d'une « ébauche d'hypothèse d'objectif »

analyser le savoir codifié et faire émerger les conceptions

mettre le savoir en situation ;

– phase interactive

clarifier le rôle de chacun (organisation du contrat didactique)

mettre l'élève en situation d'apprendre (définition d'un projet)

réguler les démarches de l'élève ;

– phase post-active

évaluer avec un regard positif, sur l'ensemble du processus

d'enseignement-apprentissage

discuter à propos de l'échec.

Sans aucun doute, le livre de P. Jonnaert et C. Vander Borght est un livre important. Il témoigne en effet d'un moment où il semble possible de totaliser et de fondre en un ensemble cohérent tout un ensemble de résultats et de problématiques de recherche

didactique d'une part, de systématiser leurs applications pour intervenir dans les pratiques normales et quotidiennes des enseignants d'autre part. On peut mesurer le chemin parcouru en comparant avec un livre aux visées équivalentes, les *fondements de l'action didactique*, de De Corte et al, paru dans son adaptation francophone chez le même éditeur en 1979 : la structure intellectuelle en était essentiellement commandée par l'exploitation des suggestions des sciences de l'éducation et de la psychologie cognitive. *Les fondements de l'action didactique* garde tout son intérêt, mais en contraste, *Créer des conditions d'apprentissage* révèle son originalité : didactique ne renvoie plus à action pratique, mais à recherche et applications de la recherche.

Toujours chez le même éditeur, mais un peu avant le livre de Jonnaert et Vander Borgh, étaient sortis les deux volumes : *Mots-clés de la didactique des Sciences* et *Pratiques de formation en didactique des sciences* (J.-P. Astolfi et al, 1997), à partir des travaux menés pendant 20 ans à l'Institut National de la Recherche Pédagogique de Paris. Le premier volume à tendance théorique, sous forme de dictionnaire, exprime certes la vision des auteurs, mais ne cherche pas à présenter une conception unifiée ; et le second volume, portefeuille de fiches d'activité et de documents de formation commentés, n'est évidemment pas organisé par un « paradigme ». Par contraste encore, on voit l'originalité de *Créer des conditions d'apprentissage*.

Il faut dans ces conditions saluer le courage et l'audace de P. Jonnaert et de C. Vander Borgh : courage pour retravailler toutes les recherches didactiques belges, québécoises et françaises, et audace pour reformuler selon leur « paradigme socioconstructiviste et interactif » les articulations principales d'une formation didactique des enseignants. Il le font avec loyauté : non seulement chaque chapitre fait apparaître les limites, et les éléments de débats qui subsistent, mais surtout ils ne cachent pas leurs choix.

De ce point de vue, je crois que leur questionnement fondamental est livré p. 267 : « Nous avons adopté une position et clarifié l'orientation donnée à cet ouvrage. Nous

n'apportons pas pour autant de réponses claires à cette question fondamentale [celle de l'origine des connaissances]. »

Sans doute la clé de l'énigme se trouve-t-elle dans le rapport « savoir / connaissance » que l'apprenant construit en mettant en interaction ses propres connaissances avec le savoir qu'il est censé apprendre. Sans doute aussi, ses connaissances se construisent-elles à travers cette dialectique « savoirs / connaissances »

Il est à mes yeux décisif, que les auteurs montrent ainsi une posture réellement didactique : l'enseignement existe déjà, il ne s'agit pas de reconstruire dans l'illusion d'une refondation totale, il s'agit d'intervenir pour l'améliorer ou le réorienter en toute conscience du choix d'un point de vue opérationnel, le « cadre socioconstructiviste et interactif ».

Ce faisant, P. Jonnaert et C. Vander Borgh appellent la discussion. La première question concerne le domaine d'intervention, ou le champ de validité de leur construction. Rien dans les titres n'annonce de restrictions : toutes les disciplines sont-elles réellement concernées ? Non à l'évidence : le suggèrent les exemples, toujours pris en mathématiques et en sciences, conformément au domaine de recherche des auteurs (didactique des mathématiques et didactique des sciences de la vie). Mais surtout, ce qui est visé est toujours l'appropriation d'un savoir de nature essentiellement discursive, écartant par exemple, même au sein de l'éducation scientifique, ce qui relève des rapports expérimenté ou expérimental aux objets et aux phénomènes. Ce savoir visé, dont l'ampleur assez réduite, pose des problèmes d'articulation avec les savoirs déjà appropriés et les connaissances de l'élève, mais pas de problèmes de structuration ou de restructuration. Enfin, il est le but et l'objet de l'enseignement, ce qui permet à celui-ci d'être piloté par des objectifs de savoirs, alors que des démarches de réalisation sur projet réglées par des normes sur la dynamique du projet de réalisation lui-même, obligeraient à considérer connaissance et savoir comme des « sous-produits » ou des composantes, mais pas comme des objectifs *a priori*.

La deuxième question concerne la démarche

des auteurs. Ils ne partent pas de difficultés, d'obstacles, de réorientations dans la mise en œuvre pratique des processus d'enseignement / apprentissage. Leur ambition est de répondre à des interrogations générales (qu'est-ce que la didactique ? qu'est-ce que le contrat didactique ? qu'est-ce que l'apprentissage ? etc.) et de développer les conséquences pratiques en les illustrant par des exemples largement pris dans leurs propres publications et leur expérience personnelle. À un bout des définitions qu'ils veulent théoriquement très argumentées, à l'autre bout des préconisations très concrètes. À la lecture, cependant, on est gêné par différents aspects de cette construction intellectuelle :

- les usages récurrents du nom et de l'adjectif didactique donnent une impression de circularité dans l'ensemble des définitions ;
- les concepts (modèles, structures) sont naturalisés ; ainsi le « savoir » qui devient un « partenaire » actif, ou le contrat qui agit ;
- la pensée passe sans avertissement d'un point de vue à un autre ; ainsi p. 206-207 la dévolution « didactique » est successivement « acte », « contexte », « mécanisme », « règle »... ;
- les prescriptions reprennent finalement des préconisations communes en dehors d'un cadre « socioconstructiviste et interactif » ; on peut se demander si un cadre unifié les renforce ou au contraire, face à l'opportunisme et à l'éclectisme de la pratique, les fragilise aux yeux des formés.

La troisième et dernière question que je poserai concerne les rapports entre contrat et relation didactiques. Pour les auteurs, le contrat fonctionne « dans » la relation et le contrat évolue selon une « dynamique ». Pourquoi choisir cette conceptualisation, et pas l'inverse : la relation serait régie en tout ou en partie par le contrat, y compris dans son évolution ? Autrement dit : relation « sous contrat » ou contrat « dans » relation ? Mais peut-être à nouveau, la conceptualisation retenue est plus « naturalisante » que l'autre. À ce titre elle est plus proche des modes de pensée communs des praticiens : cela en facilite l'assimilation, mais cela éloigne d'une accommodation exigeant le détour par des modèles abstraits.

En tout cas, remercions les auteurs pour leur contribution : « *se non e vero, e bene trovato* ». Il faut absolument lire *Créer des conditions d'apprentissage*.

J.-L. Martinand

LAFORTUNE L., SAINT PIERRE L. (1998). *Affectivité et métacognition dans la classe- Des idées et des applications concrètes pour l'enseignant*. Bruxelles-Paris, De Boeck Université- Pratiques pédagogiques, 256 p.

L'ouvrage de Louise Lafortune et Lise Saint-Pierre : « *Affectivité et métacognition dans la classe : des idées et des applications concrètes* » comporte trois parties de tailles très inégales. La première partie présente de manière synthétique les recherches touchant l'interaction entre l'affectivité et l'apprentissage et se focalise sur les interactions existant entre l'affectivité et la métacognition, remettant à une autre occasion l'étude des relations existant entre processus cognitifs et affectifs. Dans cette partie sont abordés un certain nombre de concepts importants relevant de la dimension affective comme celui d'attitude, d'émotion, de motivation, d'attribution ou de confiance en soi. Cette présentation est relativement brève mais suffisante pour les enseignants et les formateurs qui cherchent à repérer leurs pratiques dans un cadre théorique reconnu mais également pour les chercheurs qui commenceraient une étude de la dimension affective dans l'apprentissage ; ils trouveront d'ailleurs dans cet ouvrage plus de 90 références de travaux, le plus souvent d'origine nord-américaine, leur permettant d'aller plus loin.

La seconde partie constitue les trois quarts de l'ouvrage. Elle présente de manière originale 26 applications permettant d'installer des activités dans la classe où la prise en compte de la dimension affective et de la métacognition peut favoriser l'apprentissage. Regroupées dans différentes catégories, ces activités proposent par exemple : de s'interroger sur ses processus mentaux, de

tirer des conclusions, de jouer avec les définitions, d'entraîner les élèves à poser des questions ou encore à faire des commentaires destinés à leurs pairs, de vérifier la certitude de ses résultats, de planifier son processus de résolution de problèmes, de se donner des buts, d'écrire un journal de réflexions, de lire un texte scientifique...

Chacune de ces applications est rédigée sous forme d'un petit chapitre où l'on trouve une introduction avec des références ou des points de vue d'experts, les différents objectifs affectifs et métacognitifs de l'activité, la procédure à suivre, des questionnaires ou des tests prêts à l'emploi, les précautions à prendre, des suggestions d'utilisation, les avantages et les limites, des références complémentaires et surtout plusieurs pages de commentaires relatant les réactions des élèves, des enseignants et des experts à cette activité. J'ai trouvé ces témoignages particulièrement intéressants et susceptibles de rendre l'application avec des élèves plausible parce que déjà balisée par des expériences préalables. Ces 26 fiches constituent donc chacune un véritable cadre, à la fois théorique et concret, pour prendre en compte rationnellement et avec prudence l'affectivité et la métacognition afin de les mettre au service des apprentissages.

Dans la troisième partie se trouve une réflexion sur la manière dont les enseignants de mathématiques (dans l'ordre collégial québécois), ayant participé à la validation des activités présentées, ont réagi. Les enseignants dans leur ensemble sont plus attirés vers les activités centrées sur les aspects affectifs et métacognitifs associés à la résolution de problèmes que sur les autres activités. Ils ont deux types de réticences : ils se demandent ce que vont penser les élèves si on fait autre chose que des mathématiques en cours de mathématiques et s'interrogent par rapport à leurs propres capacités à animer et à réguler un groupe sur des thèmes non-disciplinaires et pour lesquels ils n'ont pas été initialement formés. D'une manière générale, les auteurs reviennent à plusieurs reprises sur la réticence des enseignants à aborder ce qui touche le champ psychologique de l'élève apprenant. Je regrette seulement que les auteurs n'aient pas poussé plus loin leur étude afin de comprendre l'origine des réticences

des enseignants. Cela aurait pu permettre de pouvoir mieux adapter la formation des enseignants et faire en sorte que, par la suite, les élèves en classe puissent être interpellés dans toutes leurs dimensions par l'enseignant et pas seulement considérés comme des élèves « épistémiques ».

Il s'agit donc d'un ouvrage écrit par des chercheurs dans le champ des sciences de l'éducation pour permettre à des enseignants et à des formateurs d'enseignants de faire évoluer leurs pratiques mais également susceptible de fournir aux chercheurs européens des références de travaux et des situations pédagogiques heuristiques. Je recommande donc sa lecture et suis reconnaissant aux éditions De Boeck-Université d'avoir réédité en Europe cet ouvrage paru préalablement en 1996 au Canada.

D. Favre

RICHOUX-AYÇAGUER H. (2000). *Rôles des expériences quantitatives dans l'enseignement de la physique au lycée*. Thèse de doctorat, Université Paris 7. UFR Sciences et techniques physiques et chimiques.

Les activités expérimentales fondées sur la réalisation et l'exploitation de mesures occupent une place importante dans l'enseignement de la physique des classes scientifiques de lycée. Or il apparaît que les situations de travaux pratiques sont en décalage avec des pratiques scientifiques pouvant faire référence. Hélène Richoux s'est proposée d'analyser finement ce décalage et de comprendre les principes qui guident les enseignants dans l'élaboration de ces séances.

Hélène Richoux positionne ses interrogations dans un cadre théorique à deux composantes : la transposition didactique (pour analyser les références scientifiques de l'enseignant et pour déterminer les critères de scientificité des activités des élèves) et la théorie des situations (pour étudier l'élaboration de la séance de travaux pratiques, déterminer les paramètres pris en compte par l'enseignant et préciser les interactions que celui-ci organise entre le milieu construit et les élèves).

Pour son investigation, madame Richoux a mené des entretiens avec quatre professeurs, experts et novices, enseignants en classe de Première scientifique à propos de trois sujets de travaux pratiques classiques (en mécanique, électricité et calorimétrie). Ces entretiens (avant et après chaque séance) ont fait l'objet de transcriptions complètes constituant la base du corpus ; celui-ci est complété par les fiches de travaux pratiques et les enregistrements audio de séances observées.

Dans son analyse du point de vue de la transposition didactique, Hélène Richoux montre, sur les cas étudiés, l'absence notable de référence des enseignants aux démarches scientifiques du « savoir savant » : les activités lors des travaux pratiques sont créées « *in situ* », fondées sur des démarches pédagogiques. Le milieu construit par l'enseignant, loin de situations « a-didactiques » souvent attendues, est au contraire clairement « didactique ». De plus, l'analyse critique des expériences quantitatives mises en œuvre dans les séances observées montre que la part de l'élève est fortement réduite par rapport à des schémas typiques de démarches scientifiques. Hélène Richoux montre comment s'opère un « glissement » de l'expérimental vers l'instrumental et le numérique : la présence d'appareils scientifiques et l'obtention de valeurs numériques à travers les mesures sont bien les critères de « reconnaissance scientifique ». Le rôle des expériences quantitatives apparaît alors tout à fait explicite : celles-ci sont essentielles à la reconnaissance d'un enseignement de science.

Hélène Richoux s'est alors intéressée aux « raisons » qui prévalent dans la construction d'un tel « milieu didactique » par les enseignants. Avec finesse elle identifie la cohérence des enseignants, au-delà des différences apparentes liées aux diverses fonctions des travaux pratiques observées : la planification globale des progressions pédagogiques et la planification interne des activités pour chaque séance apparaissent alors comme un souci premier des enseignants. Comme synthèse de ses analyses, Hélène Richoux présente un

schéma de « fonctionnement » de l'enseignant-constructeur faisant apparaître un système de gestion des contraintes et une composante « modèle d'enseignement » dans lequel l'élève apparaît en tant que « élève générique » représentatif de la classe. Elle montre ainsi la professionnalité des enseignants experts, dimension qu'elle pense devoir être prise en compte dans tout projet de formation des futurs enseignants.

Bien que fondé explicitement sur des études de cas, ce travail conduit à une réflexion approfondie sur les éléments déterminants qui guident les enseignants de sciences physiques dans leurs choix. Appuyé sur une méthodologie développée avec rigueur, et présentée minutieusement, offrant des annexes très soignées, ce travail présente une thèse qui marque un changement d'orientation dans les travaux didactiques centrés sur l'enseignement et les enseignants, et les résultats sont importants à double titre : théorique pour la didactique mais pratique dans l'amélioration de l'enseignement et de la formation des maîtres.

D. Beaufile