Modélisation dimensionnellement réductrice et traitement « particulaire » dans l'enseignement de la physique[1]

A new way of looking at size reduction in the teaching of physics

Reduccion dimensional y tratamiento "particulario" en la enseñanza de las ciencias fisicas

Dimensionale Reduzierung und partikulare Behandlung im Unterricht der Physik

Laurence VIENNOT

Université Paris 7
2, place Jussieu
75251 Paris cedex 05
viennotl@ccr.jussieu.fr

(1) Ce texte développe une présentation effectuée lors de la quatrième journée de l'école doctorale « savoirs scientifiques » de l'université Paris 7, sur le thème « continu-discontinu : passages et points critiques » (9 mars 2005).

Résumé

Des procédures courantes de modélisation dans l'enseignement de la physique, intervenant dans un large éventail de niveaux scolaires autour du baccalauréat, reviennent à réduire dimensionnellement (c'est-à-dire du point de vue des dimensions d'espace) l'objet en étude. Cet article s'attache à analyser deux de ces procédures, qui conduisent à la reconstitution d'un ensemble continu à partir d'éléments de dimension inférieure. La première implique plusieurs éléments réduits : l'image optique vue comme l'ensemble des points images, ou encore un flux lumineux vu comme un ensemble de rayons ; la seconde n'en implique qu'un : l'objet, via un calcul de moyenne, est réduit à une « particule ». Des éléments de constat sur les pratiques actuelles, sur les difficultés observées lors d'enquêtes anciennes ou récentes, sur certains textes officiels ou de recherche, enfin sur l'évaluation d'interventions didactiques sont rassemblés ici avec la visée d'illustrer les enjeux de compréhension associés à cette question et d'alimenter une réflexion sur l'intérêt de recherches prenant en compte cette ligne d'analyse.

Mots clés : *modélisation en physique, réduction dimensionnelle, difficultés conceptuelles, pratique enseignante.*

Abstract

Current modelling methods in the teaching of physics to a diverse scholastic audience of 17-18 year-olds basically concerns physically reducing in size the object studied. This article looks at two of these methods whose goal is to rebuild a continuous whole from a group of smaller elements. The first concerns all the minute elements which make up a whole - for example, an optical image being considered as a group of smaller points or a light source being considered as group of several smaller light beams. The other concerns a unique element (i.e. a particle) which represents the whole based upon a calculation of averages. What has been noticed about current methods, about certain difficulties encountered in earlier and recent studies, about some items of the syllabi and of some research papers as well as teaching methods has been included in this paper. The point is to illustrate the importance of a pupil's understanding of this topic and fuel research which takes this theory into consideration.

Keywords: *miniature models in physics, size reduction, difficulties in understanding, teaching methods.*

Resumen

El artículo se centra en el análisis de lo continuo a través de lo "dimensionalmente reducido" y esto en una perspectiva didáctica. Se trata de lo que el uso escolar se autoriza en este ámbito – por ejemplo un sólido o una imagen *óptica considerados como "conjuntos de puntos" o también haces de luz considerados como "conjuntos de rayos" y las consecuencias eventuales de ésto sobre lo que entienden los estudiantes. Se comentan tambien aquí, del punto de vista de la enseñanza, las nuevas interpretaciones de cálculos de la media en casi-constancias semi locales, especie de extendimiento de puntos y de valores que se les afecta y que podrían revelarse prácticas reductoras al nivel de la comprensión de los fenómenos. Dos ejemplos apoyan esta segunda parte : el teorema del centro de masa, y la presión de un globo de Mongolfier. El artículo pretende ser una incitación a desarrollar una consciencia más clara de las prácticas corrientes de enseñanza y de sus repercusiones.*

Palabras clave: *modelización en ciencias físicas, reducción dimensional, dificultades conceptuales, práctica docente.*

Zusammenfassung

Hauptgegenstand dieses Artikels ist die Analyse des Kontinuums über den Weg des "dimensional Reduzierten", und zwar von einem didaktischen Blickwinkel aus. Es handelt sich um das, was sich der Schulbrauch auf diesem Gebiet erlaubt – zum Beispiel um einen festen Körper oder um ein optisches Bild, die wie "Mengen von Punkten" behandelt werden, oder auch um Lichtkegel, die wie "Mengen von Strahlen" betrachtet werden, und darüber hinaus um die etwaigen Folgen von all dem auf das, was die Studenten verstehen. Es werden ebenfalls unter dem Gesichtspunkt des Unterrichts die Neuinterpretierungen der Durchschnittsrechnungen in halblokalen Quasi-Konstanten besprochen: diese Quasi-Konstanten gleichen Staffelungen von Punkten und von Werten, die diesen Punkten zugewiesen werden und sie können sich als reduzierende Praktiken in Bezug auf das Verständnis der Phänomene erweisen. Zwei Beispiele untermauern diesen zweiten Teil: der Lehrsatz vom Mittelpunkt einer Masse und der Druck in einem Heißluftballon. Der Artikel will dazu anregen, ein schärferes Bewusstsein der üblichen Unterrichtspraktiken und ihrer Zielsetzungen zu entwickeln.

Schlüsselwörter: *Modellierung in Physik, dimensionale Reduzierung, begriffliche Schwierigkeiten, Unterrichtspraxis.*

INTRODUCTION

Le débat immémorial sur la place qu'il convient de faire aux pôles de l'axe continu-discontinu dans la description du monde matériel s'est ravivé à l'occasion des grandes crises qu'ont constituées la théorie atomique au XIX^e^ siècle et la mécanique quantique au début du XX^e^ siècle. Ces spectaculaires bouleversements, aux précurseurs beaucoup plus anciens dans le premier cas que dans le second, ont quelque peu monopolisé le débat entre ces deux visions du monde, où aspects métaphysiques ou religieux prirent à l'occasion une large place. Les lignes qui suivent abordent, à propos d'objets cette fois tout à fait ordinaires de la théorie physique, une question que l'on peut considérer comme connexe : celle des différentes formes de réduction dimensionnelle opérées dans l'analyse du réel. Les questions que soulèvent la modélisation d'une source étendue de lumière par un ensemble de points peuvent apparaître bien ternes au regard des controverses historiques évoquées ci-dessus. Sur le plan didactique pourtant, une telle opération n'est pas neutre et mérite qu'on s'y arrête, malgré la grande banalité de cette procédure. Différentes modalités de réduction dimensionnelle viendront alimenter les réflexions qui suivent. La première consiste à utiliser des éléments de dimension N_r comme représentants d'un ensemble de dimension N supérieure à N_r (par exemple, des points pour des lignes ou des surfaces, ou encore des lignes pour des surfaces ou des volumes). Une autre modalité de réduction de l'analyse consiste à simplifier la description d'un ensemble inhomogène par le truchement de moyennes, remplaçant ainsi une distribution éventuellement continue de valeurs par une seule. Il s'agit là d'une démarche essentielle en physique, bien évidemment. Toute la physique statistique mais, plus fondamentalement, tout abord pragmatique d'un système ordinaire, utilise ce mode de description. On ne commente ici que certains aspects de cette démarche qui, d'une part, peuvent se révéler problématiques, et d'autre part, confinent au thème de la réduction dimensionnelle. En fait il ne s'agit plus, comme dans l'exemple de la conjugaison optique, de représenter un ensemble par quelques-uns de ses éléments isolés par la pensée, mais plutôt de résumer ses propriétés par une valeur unique de grandeur physique. Celle-ci, on le verra, peut être attribuée à un seul de ses points (le centre d'inertie dans l'exemple qui suit) ou au contraire, plus ou moins subrepticement, étendue à l'ensemble dont elle efface l'inhomogénéité (comme le cas du gaz parfait dont on oublie qu'il est dans un champ de pesanteur). Dans un cas comme dans l'autre, on n'est pas loin de penser un système étendu comme une « particule », terme à la définition souvent imprécise mais au demeurant très familier en physique.

Le but de cet article est de localiser des enjeux conceptuels éventuellement sous-estimés et les difficultés d'enseignement susceptibles d'être associées à ces formes plus ou moins caractérisées de réduction dimensionnelle. On se limite ici aux dimensions d'espace telles que les distinguent les physiciens : un volume (respectivement une surface, une ligne) s'inscrit dans un espace à trois (respectivement deux, une) dimension(s). Cette réflexion se fonde sur une analyse a priori du contenu et sur une prise en compte, en contrepoint, des pratiques d'enseignement courantes.

Pour ce qui est du premier point, l'angle d'analyse exposé plus haut (dont la spécificité restreint considérablement le champ de l'étude par rapport à l'évocation globale des problèmes liés à la modélisation) et les rapprochements qu'il suggère n'ont guère été auparavant, à la connaissance de l'auteur, adopté en tant que tels dans un contexte de recherche de didactique de la physique. La géométrie projective, en mathématiques, a fait l'objet de recherches (Colmez & Parzysz, 1993 ; Parzysz, 1991). S'y rattachent bien entendu les questions de représentation iconique en deux dimensions pour des objets à trois dimensions. Les cas qui sont analysés plus loin ne relèvent pas de ce type de transformation projective. Ils se rattachent à l'idée de *représentation*, au sens où, à partir de ce que l'on sait des éléments de dimension inférieure (par exemple des points sources et leurs images), on reconstitue ce qu'il en est des éléments de dimensions supérieures (par exemple une source étendue et son image) ; ceci sans qu'il y ait de correspondance projective en cause, mais plutôt l'idée d'un tout à reconstituer à partir de quelques éléments *constitutifs* de l'ensemble. Ce thème reprend sous un autre label l'idée d'« échantillonnage » proposée par Fawaz et Viennot (1986), terme non retenu dans cet article à cause de la connotation statistique qui risque d'en perturber la compréhension. Le parti pris adopté ici est qu'une étude précisant et illustrant cet angle d'analyse peut orienter et éclairer de nouvelles recherches portant sur les difficultés des apprenants et sur les interventions didactiques envisageables à leur propos.

Quant aux pratiques d'enseignement qui sont ici qualifiées de courantes, divers indicateurs (éléments d'analyse des textes officiels et / ou des manuels scolaires, ou encore état des lieux retraduit par un article de recherche) donneront des indices sur le niveau actuel de prise en charge des difficultés discutées ici.

Lorsque des recherches attestent, sur un thème particulier, l'importance des difficultés rassemblées dans cette analyse, il en sera fait brièvement état. Lorsque des résultats d'intervention didactique seront mentionnés, ce sera essentiellement à titre d'éclairage des difficultés appréhendées par cette étude.

La fonction voulue pour ce texte étant de s'appuyer sur un regroupement d'éléments pour spécifier une catégorie de difficultés conceptuelles, chacun des points ainsi évoqués ne pourra, pour des raisons évidentes de brièveté, être développé à loisir : seuls les traits qui semblent essentiels pour le propos retenu y seront déclinés.

1. LES « REPRÉSENTANTS » ET L'ENSEMBLE : EXEMPLE DE L'OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

L'optique géométrique élémentaire est un terrain de choix en matière de réduction dimensionnelle : on y voit des points (dimension « zéro » dans le langage du physicien) représenter la surface émettrice tout entière (dimension deux), et des lignes (dimension « un ») indiquer la structure en volume (dimension « trois », sans tenir compte du temps) du flux d'énergie. Le terme « représenter » est à prendre ici au sens qu'il a dans l'introduction, c'est-à-dire qu'à partir de ce que l'on sait d'éléments de dimension inférieure, compris comme constitutifs d'un ensemble (par exemple des points sources et leurs images), on reconstitue ce qu'il en est de l'ensemble en question, de dimension supérieure (par exemple une source étendue et son image).

L'objet comme ensemble de points

En matière de correspondance objet-image, il est rituel de s'intéresser à un objet dont le « pied sur l'axe » et l'extrémité le plus éloignée de l'axe vont définir, via leur conjugués optiques, les extrémités de l'image, comme l'indique le non moins rituel schéma de la figure 1.

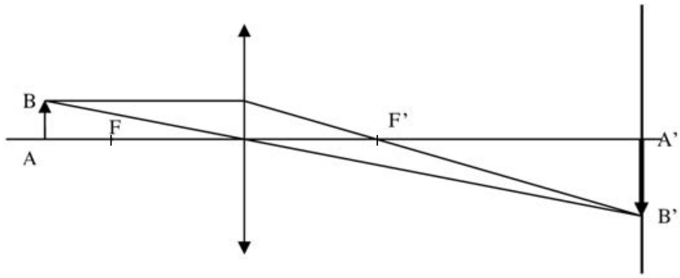


Figure 1 • **Un schéma classique à propos de la conjugaison optique objet-image via une lentille convexe mince**

Derrière cette habitude réside la propriété d'« aplanétisme » (voir sur ce point et sur la « condition d'Abbe », Bertin *et al.*, 1986, p. 123 et 130), que garantissent, au moins de manière approchée, les conditions particulières dites « de Gauss » (c'est-à-dire, globalement, « faibles » dimensions linéaires et angulaires de l'objet). Cette propriété permet d'affirmer que tous les points de l'objet situés dans un plan objet donné, perpendiculaire à l'axe, ont une image située dans le même plan image, perpendiculaire à l'axe.

Dans le langage du schéma de la figure 1, on dira ainsi que tous les points situés sur le segment [AB] ont une image sur le segment [A'B']. Dans le cas d'une lentille mince, les points conjugués sont alignés avec le centre optique, et donc il suffit de tracer une droite issue d'un point objet pour trouver son image, dès lors que l'on sait dans quel plan perpendiculaire à l'axe se trouve celui-ci. Or ce plan est déterminé par les points A' et B'.

Physiquement parlant, c'est la ressemblance de l'objet et de l'image qui est en cause, en d'autres termes, la valeur constante du grandissement linéaire pour tous les couples concernés. Il n'est que de voir sa propre image dans un miroir déformant pour comprendre l'intérêt de cette propriété d'aplanétisme.

Or la relation entre la propriété d'aplanétisme et la ressemblance en question n'est, le plus souvent, pas enseignée. La ressemblance semble parfois quasi-obligée, à lire par exemple Buty *et al.* (2004, p. 592), qui la présente comme une conséquence non problématique du stigmatisme : *the image looks like the object because to each point of the object corresponds a unique image point* (« l'image ressemble à l'objet *puisqu'*à chaque point de l'objet correspond un seul point image »). Le fait qu'un article de recherche en didactique ne questionne pas un aspect de savoir qu'il présente comme à enseigner, sur la base du programme actuel de quatrième en France, est, c'est là une hypothèse peu risquée, un reflet de la pratique scolaire courante. D'ailleurs, le point objet est laconiquement défini dans le commentaire du programme en cours de 1re S (grade 11) en France (BOEN, 2000, p. 195) : « on désigne par « point-objet » un point de l'objet étudié ». Il ne fait pas l'objet d'explicitation dans le document d'accompagnement (BOEN, 2002, p. 97 et p. 100), sinon pour préciser qu'un tel point est « susceptible d'envoyer de la lumière dans toutes les directions » et que voir « complètement » l'objet c'est voir « tous » les points visibles ». De même, aucun des programmes du secondaire de voie générale en cours actuellement en France (BOEN, 2000, 2001, 2005) ne mentionne l'explicitation de l'aplanétisme sous une forme ou une autre, ne serait-ce que via le fait que l'expression du grandissement enseignée ne dépend que des positions (des « pieds sur l'axe », comme on dit communément) de l'objet et de l'image. Un examen direct de divers textes de niveau universitaire sur l'imagerie optique vient renforcer ce constat, dans la mesure où livres et pratiques se reflètent mutuellement. Par exemple, une allusion à l'aplanétisme n'intervient qu'indirectement (le mot n'est pas utilisé) et discrètement, quinze lignes avant la fin du chapitre « stigmatisme et approximation de Gauss » (May, 1993, p. 28), dans la spécification des conditions de Gauss : « l'objet est plan, perpendiculaire à l'axe du système, et de dimension suffisamment réduite pour que son image soit également plane (ou rectiligne) ». Le terme « aplanétisme » ou toute autre expression équivalente ne figure pas dans l'index des ouvrages fort connus de Hecht (1987, 1999), mais aussi de Crawford (1968), de Giancoli (1993), pas plus que la condition pour cette propriété, dite « condition d'Abbe ». Le plus souvent, c'est en négatif seulement que l'aplanétisme est implicitement évoqué, au moment d'analyser les aberrations optiques. La procédure d'imagerie aux points extrêmes est, elle, très généralement pratiquée, on n'ose pas dire « enseignée » tant, d'emblée, elle semble aller de soi.

Pourtant on peut douter que cela soit toujours le cas, lorsque l'on considère par exemple le détournement d'automatisme dont témoigne la figure 2.

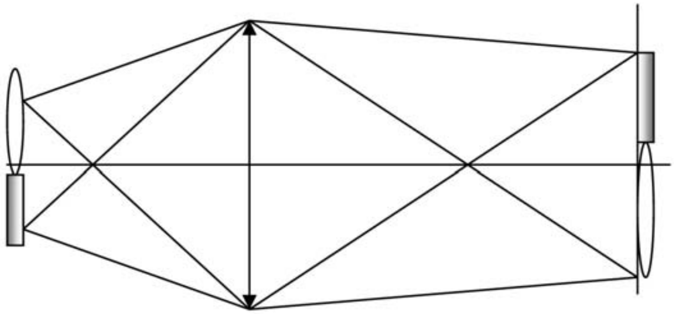


Figure 2 • **L'image d'une bougie sur un schéma à compléter, seul le dessin de l'image n'était pas fourni : une réponse non exceptionnelle d'élève de 1re S**

Celui-ci a été obtenu (Fawaz & Viennot, 1986) dans une proportion notable sur un échantillon de 58 élèves de 1re S à qui, donnant la correspondance optique pour deux couples de points objet-image, on demandait de tracer l'image de l'objet entier : 41 % limitent ce que l'on voit sur l'écran à un ou deux points (20 %) ou, comme sur la figure 2, au segment qui les joint (21 %). On peut voir dans ce dernier cas l'image en quelque sorte « astreinte » à tenir entre les deux points images fournis. Il s'agit donc d'un cas de reconstitution dimensionnelle (au sens où l'on reconstitue un objet continu représenté dans une dimension à partir de deux points) en pur automatisme et sans maîtrise aucune de la fonction *représentative* (au sens précisé plus haut) d'un couple *quelconque* point de l'objet / son image. Ces réponses sont difficilement attribuables, dans une relation simple, au vécu quotidien des élèves, et l'hypothèse que l'enseignement reçu, tout à fait classique, avait influencé ceux-ci dans le sens de l'automatisme observé est, à tout le moins, à considérer. Au moins cet exemple de réponse constitue-t-il une incitation à la vigilance.

Une autre question se pose, plus classiquement reconnue comme dimensionnelle. Le principe de conservation de l'énergie associé à la modélisation géométrique des flux d'énergie (de point à point et entre des surfaces coniques dont les rayons lumineux sont les génératrices) impose que la densité de flux d'énergie soit infinie au point source comme au point image. Embarrassante considération dont beaucoup ont appris à ne pas s'embarrasser, puisqu'au moins, dans la tradition française, on n'évoque que très partiellement l'énergie en optique géométrique. Bien entendu, un traitement dimensionnellement cohérent est disponible, sous le label « photométrie ». Il y intervient, de manière incontournable, les notions d'élément de surface et d'angle solide. On conviendra qu'un tel traitement ne s'impose pas dès les premières heures d'enseignement de l'optique. Sans doute est-il utile, en revanche, d'avoir présent à l'esprit, lorsqu'on enseigne l'optique à tout niveau, que l'on frise l'absurde en manipulant cet objet commodément réduit : « le point ». Imaginons par exemple une question d'élève : « faut-il que les points images soit plus gros que les points objets pour couvrir toute la surface de l'image, dans le cas d'un grandissement plus grand que 1 ? ». May (1993, p. 25). Elle prend la précaution de définir une source ponctuelle (« un objet lumineux vu par l'œil sous un angle inférieur à une minute d'arc »), en référence implicite à la structure de la rétine. On aura bien sûr noté que cet auteur spécifie bien de quoi elle parle, à savoir d'un objet physique (source ponctuelle), dont on doit comprendre qu'il est modélisé, *du point de vue géométrique*, par un objet mathématique : un point. Lue dans une référence pure à la définition mathématique d'un point, la question mise ici dans la bouche d'un élève ne serait tout simplement pas compréhensible. Pour autant, on ne peut prétendre qu'elle soit totalement improbable et sans aucune pertinence, compte tenu de l'enseignement habituellement dispensé. Elle figure ici avant tout pour attirer l'attention sur le caractère éminemment non trivial de cette définition banale : l'objet est l'ensemble des points objets, l'image est l'ensemble des points images (BOEN, 2002 ; Buty *et al.*, 2004, p. 590).

Ce minuscule exemple (le « point » en optique) est là pour introduire l'idée que l'on peut avoir intérêt à réfléchir et à faire réfléchir sur le plus ordinaire des cas de réduction dimensionnelle, fut-il ritualisé au possible.

Le flux de lumière comme ensemble de rayons

Considérons un autre exemple, cette fois en dimension 1 : le rayon. Là encore, il s'agit d'un objet conceptuel chargé de nous renseigner sur plus gros que lui. Il peut se trouver en situation de définir des limites. Ainsi la figure 3 rappelle de classiques exercices d'optique élémentaire, où un objet opaque s'interpose entre une source étendue et un écran : il s'agit de trouver les zones de l'écran pleinement éclairées, dans l'ombre ou dans la pénombre, et aussi les zones de la source visibles par chacun des trous de cet écran (document d'accompagnement 4e, 1992 ; Hirn-Viennot, 2000).

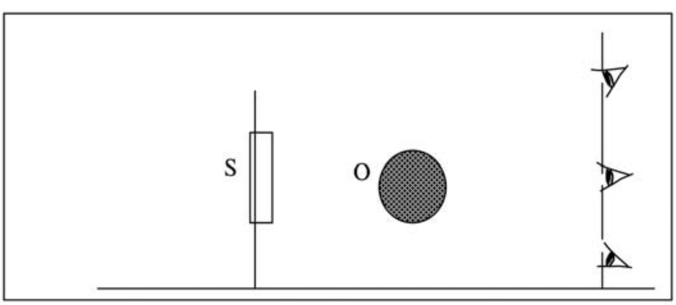
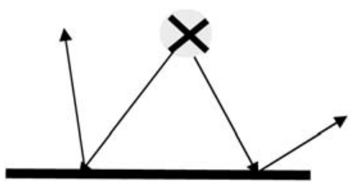


Figure 3 • **Support pour un exercice classique de délimitation de zones. S : source étendue, O : objet opaque**

Au sens propre, un rayon joue le rôle de représentant, toujours au sens défini plus haut, pour un flux, comme le point l'est pour l'objet source, c'est-à-dire qu'il renseigne, seul où en combinaison avec un autre rayon, sur ce qu'il se passe dans un espace de dimension supérieure à la sienne. Les figures 4 et 1 illustrent cette fonction, respectivement pour un dessin visant l'explication de la diffusion et pour le schéma rituel de construction d'image « à l'aide de deux rayons ». Il s'agit, dans ces deux cas, de voir les lignes dessinées comme guides indiquant ce que font tous les rayons issus d'un même point même si, dans le cas de la diffusion, il faut comprendre que ces rayons repartent dans toutes les directions alors que, dans la correspondance stigmatique, ils vont tous au même endroit. Ce rôle générique ne va pas de soi, surtout lorsqu'un autre rôle possible s'interpose, témoin l'interrogation d'un enfant qui cherchait à lire le schéma de la figure 4 en terme de limite de zone : « M'sieur, c'est faux » (Hirn & Viennot, 2000, p. 376).



« M'sieur, c'est faux parce que l'écran est éclairé en entier et pas sur une toute petite partie. »

(le professeur enchaîne sans signaler que l'on ne parle plus de limites de zones, ce qui était le cas jusque-là).

Figure 4 • **L'étonnement d'un enfant de quatrième pour qui les rayons n'avaient eu jusque-là pour fonction que de limiter des zones de visibilité ou d'éclairement, épisode non acté par son professeur**

Cet exemple illustre, à travers le fait que le professeur ne réagit pas vraiment à la question de l'enfant, que la mesure de la difficulté n'a pas été prise, au moins chez cet enseignant.

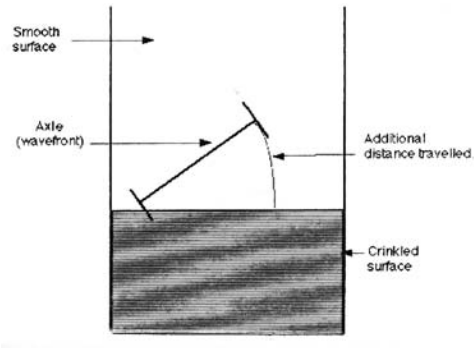
Pour ce qui est du rôle de représentant de deux rayons, il est courant de voir des étudiants de première année d'université qui savent tracer la marche d'un rayon pour une lentille mince, puis d'un deuxième rayon issu du même point, et qui, interrogés sur un troisième rayon venant du même point, mettent en œuvre leur algorithme miracle une troisième fois, au lieu d'utiliser le fait que l'intersection des deux premiers constitue un point de passage désormais obligé. Nous reviendrons ci-dessous sur des moyens de prendre en compte plus explicitement, dans l'enseignement, le rôle représentatif des « rayons », et l'on pourrait dire aussi des « points », de construction. A cette occasion seront évoquées des difficultés extrêmement classiques liées à cette question. Mais auparavant, deux remarques peuvent contribuer à souligner le caractère problématique de la modélisation d'un flux de lumière par des rayons.

Dans une situation du type de la figure 4, lors d'une enquête évoquée plus loin (Viennot & Kaminski, 2005), un élève de terminale S (grade 12) écrivait : « la zone centrale de l'écran sera éclairée plus intensément que les bords de celui-ci car sur une longueur donnée le *nombre* de rayons incidents sera plus faible sur les bords, du fait de l'angle entre l'écran et les rayons incidents. » Or la rencontre d'un rayon et d'un écran, cela ne fait jamais qu'un point : fait-on plus d'énergie avec « plus de points » ? C'est une question dérangeante. Et pourtant, avouons-le, en tant qu'enseignants, nous aimons bien entendre ce raisonnement déjà très évolué et somme toute assez rare.

Autre exemple de considération réduite de la dimensionnalité des phénomènes, la réfraction comporte aussi quelque difficulté. Si nous voulons prédire la suite des événements pour un rayon qui traverse une surface qui sépare deux milieux d'indices respectifs n_i et n_r, nous utilisons la loi de Snell-Descartes. Il faut donc que soit déterminé l'angle d'incidence i_i pour trouver l'angle de réfraction i_r, lesquels angles se définissent par rapport à la normale à la surface de séparation. Une modélisation satisfaisante du phénomène ne peut donc se réduire à une description unidimensionnelle, elle doit également faire intervenir une dimension transversale, en écho à l'importance déterminante de l'*orientation* de la surface séparant les deux milieux de propagation. Certes, lorsqu'on connaît les lois de Snell-Descartes et la normale à la surface, on peut décrire le trajet d'un seul rayon de manière indépendante des rayons voisins, comme le suggère par exemple Maurines (2001, p. 53). Pour elle, les rayons de l'optique géométrique « peuvent être séparés sans être modifiés », ou encore sont « distinguables ». Mais s'il faut *interpréter* le phénomène de réfraction, une telle modélisation se révèle bien pauvre, car un rayon isolé ne croise une surface qu'en un seul point, ce qui nous renvoie à la remarque faite plus haut sur l'existence d'une dimension transversale intrinsèque au phénomène. Ainsi, interprété comme représentatif d'une onde associée (son vecteur de Poynting, dont la valeur est la densité de flux de puissance), le rayon lumineux peut voir sa réfraction mise en relation analogique avec des modèles classiques au moins bidimensionnels. En effet, dans un de ces modèles classiques, un front d'onde qui croise de biais l'interface entre deux milieux d'indice différent peut lui-même se voir modélisé par un attelage à deux roues descendant en biais sur une planche inclinée, avec deux zones de rugosité différente, correspondant chacune à une vitesse de roulement différente (voir le modèle illustré en figure 5, Taylor, 1994) : la déviation observée résulte dans les deux cas d'une différence de vitesse de propagation (dite « de phase » dans le cas de l'onde) entre des entités disposées *transversalement* par rapport à la direction de propagation. Or dans le cas de l'onde, ces entités sont justement les rayons. S'insurger contre le caractère bidimensionnel de tels modèles, comme le font Gilbert *et al.* (1998), reviendrait à se priver de leur caractère interprétatif.

Bien entendu, on trouve un écho de cette discussion dans la description quantique de la propagation lumineuse, et ce n'est pas gratuitement qu'un auteur comme de Broglie (1941, p. 55) précise dans un ouvrage destiné à des non spécialistes, à propos des aspects de la propagation classiquement qualifiés de « corpusculaire » et « ondulatoire » : « ce qui arrive sur la surface du cristal, ce n'est pas un grain bien localisé courant le long d'une droite, c'est tout un champ de possibilités de localisation, représenté par l'onde de la mécanique ondulatoire, champ qui explore, qui tâte pour ainsi dire toute la surface et toutes les couches superficielles du cristal ».

De nouveau, on constate qu'à réfléchir sur un sujet apparemment anodin, de vraies questions de physique se profilent à l'horizon. Afin que ces questions n'apparaissent pas comme de stériles jeux de l'esprit, citons ici une expérience qui souligne le fait qu'une explicitation ciblée, dans la ligne de la discussion précédente, peut faciliter la compréhension de phénomènes physiques que l'on souhaite classiquement enseigner.



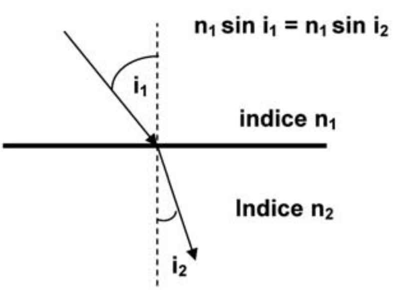


Figure 5 • **Un modèle analogique proposé pour la réfraction a) (Taylor, 1994) et un modèle plus classique b)**

Une explicitation graphique du rôle représentatif des rayons : éléments de validation

On sait depuis longtemps (Guesne, 1981) que le principe même du stigmatisme optique, rappelé plus haut, est souvent très mal compris, et laisse la place, à en croire les erreurs et commentaires d'élèves et d'étudiants, à des modèles implicites de transport global de l'image (Fawaz & Viennot, 1986 ; Feher & Rice, 1987 ; Galili & Hazan, 2000 ; Goldberg & Mc Dermott, 1987). Ceux-ci ne sont donc pas compatibles avec l'idée que chaque point de la source envoie dans tout l'espace de la lumière qui s'y propage rectilignement et de manière isotrope. Des trous dans les images dûs,

selon les personnes interrogées, à la pose d'un cache central sur une lentille, ou des « images » décrites comme allant toutes seules sur le mur voisin en l'absence de lentilles, autant de réponses communes qui témoignent de cet état de fait. On voit bien qu'à se centrer uniquement sur les rayons de construction, il y a risque de renforcer cette vision de transport horizontal de l'image, comme l'ont signalé plusieurs auteurs (Beaty, 1987 ; Fawaz & Viennot, 1986 ; Galili-Hazan, 2000 ; Kaminski, 1991, 1993 ; Viennot, 1996, 2003). D'après leurs analyses, un schéma d'explicitation « de base » a été défini par Viennot et Kaminski (2005) comme comportant les éléments suivants :
- on représente d'autres rayons que ceux dits « de construction », ainsi que des faisceaux de lumière ;
- la propagation isotrope et rectiligne de la lumière tout autour de la lentille est suggérée.

On reconnaît dans la première caractéristique le principe même de l'imagerie optique au sens de Kepler, et l'intention de souligner que les rayons de construction ne sont pas plus constitutifs de l'image que les autres. Quant à la seconde, d'allure anodine, elle souligne le fait que même la lentille entière ne traite qu'une partie du flux, au même titre que l'une quelconque de ses différentes zones.

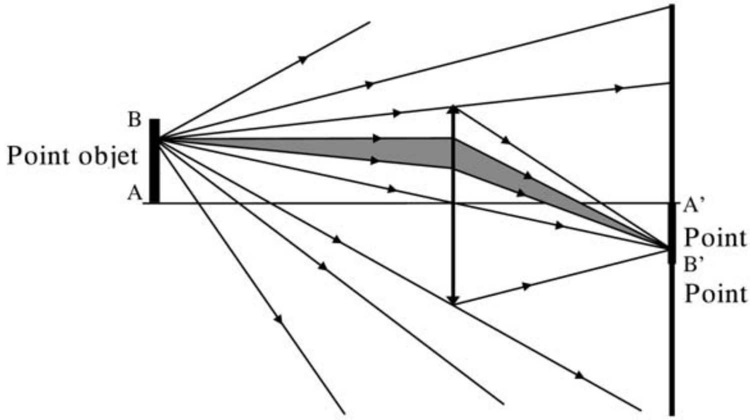


Figure 6 • **Un schéma défini ici comme étant schéma « de base » (le point est un point courant)**

Dans l'enquête mise en œuvre par ces auteurs, des groupes ayant préalablement reçu un enseignement classique d'optique géométrique élémentaire en France (60 professeurs stagiaires en seconde année d'IUFM d'une part, 20 étudiants de licence d'autre part) ont été soumis à deux questions classiques, telle la prévision de l'effet sur l'image d'un cache posé au centre d'une lentille. Systématiquement, chaque groupe d'un type donné (enseignants stagiaires ou étudiants de licence) était séparé en deux sous-groupes de manière aléatoire, un sous-groupe recevant la question introduite par le schéma classique et l'autre moitié recevant le schéma défini plus haut comme étant schéma « de base ». Il s'agissait d'évaluer si le simple fait de fournir un schéma explicitant le principe même de l'imagerie optique pouvait aider les personnes interrogées à raisonner sur les situations proposées.

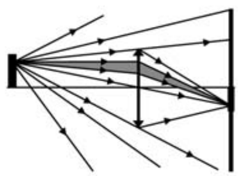
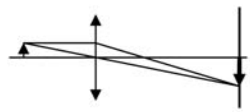
« On place un cache sur le centre de la lentille : que voit-on maintenant sur l'écran ? » *catégories exclusives*↓	**Situation introduite par le schéma de base :** 			**Situation introduite par le schéma classique :** 		
	Professeurs stagiaires : N=29	Etudiants de licence : N=10	Ensemble : N=39	Professeurs stagiaires : N=31	Etudiants de licence : N=10	Ensemble : N=41
La même chose ou A'B' (+)* moins lumineux, (+)* approximation de Gauss	26	8	34	17	2	19
Un trou noir au centre de l'écran ou de l'image, ou image du cache, ou tache noire + halo	3	2	5	14	8	22

Tableau 1 • **Taux de réponse pour la question du cache ;**
*** correspond à « éventuellement »**

On trouvera dans la contribution de Viennot et Kaminski (2005) plus de détails sur l'enquête, ses résultats, les circonstances qui permettent d'espérer un contrôle de l'effet d'un outil didactique aussi ténu que celui-ci. Disons simplement ici qu'à un niveau supérieur ou égal à la licence, ce seul facteur apparaît, associé à une différence très significative des résultats pour deux questions traditionnellement révélatrices des idées communes évoquées plus haut. En l'occurrence, pour la question du cache (tableau 1), le schéma « de base » est associée à un nombre plus restreint d'élèves évoquant une « image voyageuse » percée d'un trou au passage du cache (χ^2 = 17,6 ; p = 0,001).

Il est donc raisonnable de penser que la relation du particulier à l'ensemble, ici le rôle représentatif des rayons, le fait qu'une partie de la lentille soit suffisante pour former toute l'image, ceci pour un ensemble de couples de points conjugués représentés par l'un d'entre eux, constituent autant de nœuds pour la compréhension du domaine et méritent explicitation. Certes le schéma « de base » dont l'impact est évalué dans cette enquête cumule plusieurs caractéristiques supposées favorables à la compréhension visée, dont il est difficile de mesurer les effets respectifs, même si tel ou tel commentaire recueilli mentionne l'une ou l'autre spécifiquement. Mais, d'une part, ces caractéristiques restent dans le même registre, assurant la cohérence de cette proposition didactique, d'autre part il est déjà rare de pouvoir mettre en évidence l'impact d'une intervention aussi limitée, pour des raisons discutées dans l'étude en question. Dans la ligne des préoccupations propres à cet article, on peut retenir sans grand risque que ces résultats témoignent de la pertinence de l'analyse proposée plus haut, laquelle pointe l'existence probable de difficultés là où les rituels d'enseignement pourraient laisser penser qu'il n'y en a pas.

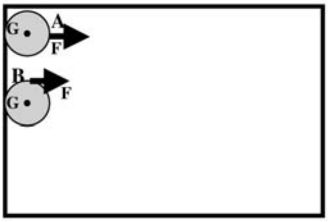
2. ENSEMBLE INHOMOGÈNE, MOYENNE, PARTICULE : LES EFFETS D'UNE PROCÉDURE RÉDUCTRICE

Avec la question des moyennes, on aborde un domaine beaucoup moins ouvertement lié à une réduction dimensionnelle. La prise en compte de valeurs moyennes de grandeurs est d'importance majeure en physique, elle est pratiquement une condition d'existence de cette discipline. Impossible en effet de connaître le détail des caractéristiques d'innombrables sous-parties des systèmes étudiés. Selon ce que l'on veut savoir, on décide de l'échelle du découpage à adopter pour l'analyse : macroscopique, mésoscopique ou nanoscopique. Cela fait, il reste toujours des parties du système dont on n'étudie pas la structure interne et à qui on attribue une valeur unique (scalaire, vectorielle, tensorielle) pour chaque grandeur physique en cause : position, vitesse, accélération, température, pression, etc. Il s'agit finalement de l'extension d'une démarche qui sous-tend déjà les exemples précédents : les points chargés de « constituer » l'objet ou l'image peuvent être vus comme la position moyenne d'un grain (le plus souvent implicitement mais parfois beaucoup plus clairement comme pour May, 1993), et les rayons renseignent sur le trajet de l'énergie en leur voisinage. Ce dernier point devient clair dès lors que les rayons considérés s'inscrivent dans une description ondulatoire comme support du vecteur de Poynting, ce qui est tout à fait classiquement enseigné au niveau universitaire. Paolo Guidoni suggérait récemment (Guidoni, 2005) que le discontinu pouvait apparaître comme le résultat d'une centration de l'attention, après une première étape de considération du continu. Les exemples suivants amènent à discuter des glissements qui peuvent se produire, à ce propos, vers l'idée d'un objet qui, d'une manière ou d'une autre, se trouve réduit abusivement.

Le théorème du centre d'inertie

La mécanique classique pose d'emblée la question : si les lois de Newton s'énoncent usuellement pour une « particule » ou un « point matériel » de masse m, comment les appliquer à des objets ordinaires ? La linéarité de la relation entre force subie et accélération ($\vec{f} = m\vec{a}$) associée à la troisième loi, dite des actions réciproques, permet de démontrer le théorème du centre d'inertie (« TCI », comme le nomment familièrement les élèves de terminale S). La formulation symbolique de ce théorème ressemble à la seconde loi, au point qu'on en oublie l'intervention de la troisième loi : $\vec{F}_{ext} = M\vec{a}$. Il n'y a là aucune approximation, seulement une procédure de moyenne vectorielle pondérée par les masses des éléments de l'objet, procédure qui informe *exactement* sur l'accélération du centre de masse, quand on connaît la masse totale M. La troisième loi, quant à elle, permet de ne retenir que les forces d'origine extérieure $\vec{F}_{ext}$ dans la somme de toutes les forces exercées sur les « particules » concernées. La validité de l'information résultante est, répétons-le, strictement celle des lois de Newton. En revanche, il est bien évident qu'à mettre en œuvre cette procédure, on perd une partie de l'information, celle qui concerne les mouvements des parties de l'objet par rapport au centre d'inertie. On résume souvent cette idée en disant que l'on peut analyser ainsi la translation de l'objet et non sa rotation.

Quel rapport avec ce qui précède ? Il en existe probablement un au plan de la compréhension commune de ce théorème (Rigaut & Viennot, 2002). Il semble que l'information qui ne concerne qu'un point dérive souvent vers la réduction de l'objet à un point. Combien de fois ne lit-on pas, notamment dans les sujets de baccalauréat : « on assimilera le corps X à son centre d'inertie » ? Pris au pied de la lettre, ces énoncés se situent dans le registre de la réduction dimensionnelle la plus radicale : du système, il ne reste qu'*un* point. Certes, dans le cas d'un champ de force inhomogène, cela met l'étudiant à l'aise pour calculer la somme des forces extérieures. Mais il est probable qu'une telle formulation, globalement réductrice, conduise à réduire la signification du TCI. Celle-ci n'est pas anodine : on peut bien analyser le point d'application particulier de chaque force d'origine extérieure sur l'objet, le TCI conduit, lui, à la conclusion stupéfiante que ce point d'application n'a aucune incidence sur le mouvement du centre de masse, seul compte le vecteur force. Dit familièrement, cela veut dire qu'on peut bien tirer sur un objet en accrochant la ficelle où on veut, ce qui compte pour le mouvement d'ensemble n'est que la valeur et l'orientation des actions exercées. La situation représentée en figure 7 (Menigaux, 1991 ; Viennot, 1996) et les taux d'erreurs associés mettent en évidence l'aspect contre-intuitif du TCI, ce qui est une source d'intérêt.



Deux palets sont sur une table à coussin d'air horizontale. La même force est exercée en permanence sur chacun d'eux (respectivement en A et B). Comment arrivent-ils à l'autre extrémité ?

Echantillon	Ils arrivent en même temps	A arrive avant B
1re S (N = 17)	6 %	83 %
Terminale C (N = 18)	22 %	61 %
Deug (N = 53)	24 %	67 %

Figure 7 • **Résumé d'une question à propos du TCI et taux de réponse obtenu lors du sondage initial**

Si on estime qu'il est fructueux d'exprimer complètement la signification d'un tel théorème, il importe de ne pas suggérer une réduction dimensionnelle abusive, et de situer bien à sa place une procédure de moyenne, fût-elle vectorielle : renseigner sur un point n'est pas ignorer l'existence des autres, ni leur éventuelle « rotation ».

Ces réflexions conduisent à préciser ce que l'on peut résumer par l'expression « particule de masse m », qui renvoie au « point matériel » de la mécanique classique. Cette expression, beaucoup plus volontiers utilisée que définie, peut s'appliquer à deux conditions. La première est que l'on ne s'intéresse pas à la rotation du système considéré. La seconde suppose que la somme des forces d'origine extérieure sur le corps en question peut s'évaluer comme si tous les éléments de celui-ci étaient situés au même point, à savoir le centre d'inertie. De ce point de vue, une étoile peut être considérée comme une « particule » en magnéto-hydrodynamique galactique.

L'exemple suivant met en jeu, cette fois, une moyenne scalaire. Il amène à discuter une autre variante d'analyse d'objet abusivement réduite.

La montgolfière : l'étendue homogénéisée

On trouve communément, en exercice d'application de statique des fluides, notamment en première année universitaire, un texte comportant les éléments suivants, à propos d'une montgolfière : sa masse totale (masse de l'enveloppe, de la nacelle et de son contenu) M_T, la valeur de la température extérieure, l'hypothèse que la pression interne est égale à la pression extérieure, et une question sur la valeur de la température de l'air à l'intérieur nécessaire pour assurer le décollage. Clairement, le principe d'Archimède est la cible de l'exercice. La fameuse « poussée vers le haut » a la même valeur que le poids d'air extérieur de même volume que la montgolfière (à peu près celui délimité par l'enveloppe). Elle doit équilibrer le poids des éléments solides de masse M_T et celui de l'air intérieur. Il reste à calculer la différence de poids des deux volumes de gaz en cause, compte tenu de leur température respective, et la solution en découle facilement. Dans le calcul des masses de gaz en cause, il est bien commode d'admettre qu'il s'agit de gaz parfaits en équilibre (ce qui permet d'utiliser la relation $pV = nRT$, ou encore $\rho = p\, M_{mol} / (RT)$ en notations habituelles) et de considérer les pressions intérieure et extérieure comme égales, du fait que l'enveloppe est ouverte à sa base. On peut trouver également ce type de modélisation dans un cadre de vulgarisation (Maury, 1987, p. 67). Mais à prendre ces hypothèses toutes au sérieux, sans autre précaution, on arrive à l'absurde : si les pressions intérieure et extérieure étaient identiques en tout point de l'enveloppe, celle-ci ne subirait au total aucune force de la part des gaz puisqu'alors chaque portion d'enveloppe subirait, de part et d'autre, deux forces exactement opposées. Faire disparaître toute inhomogénéité de ce problème, c'est nier la poussée d'Archimède, laquelle ne fait que traduire, via un théorème intégral, l'effet global d'un gradient de pression, celui-là même qu'indique la formule de base de la statique des fluides : $\Delta p = - \rho\, g\, \Delta h$. D'ailleurs, il suffirait que la distribution de pression dans les gaz respecte une symétrie sphérique pour qu'une orientation particulière de la force résultante (en l'occurrence vers le haut) soit impossible. La procédure intégrale de calcul de la poussée s'accommode bien d'une valeur moyenne de pression pour évaluer le « poids du volume déplacé » lequel, via l'expression de la masse volumique ρ, est affecté par la différence notable de température entre l'intérieur et l'extérieur. Mais si cette procédure glisse vers une vision d'homogénéité, la moyenne envahissant en quelque sorte tout le volume disponible, elle enterre l'origine même du phénomène. Utile pour le calcul, cette procédure ne doit pas contaminer la vision du phénomène, lequel est essentiellement lié à des différences locales de pression sur l'enveloppe. La figure 8 évoque les gradients de pression intérieur et extérieur, gradients dont la différence traduit celle qui existe entre les masses volumiques moyennes : de bas en haut, la pression diminue moins vite à l'intérieur qu'à l'extérieur car l'air plus chaud est moins dense. Là réside l'explication du fait que la pression est, sauf à l'embouchure, plus grande à l'intérieur qu'à l'extérieur (notamment en haut de l'enveloppe), assurant ainsi la sustentation de l'ensemble. Pour faciliter la compréhension de cette explication, la modélisation proposée en figure 8 attribue à la montgolfière une forme cubique (évidemment peu usuelle) afin d'éviter toute complication dans la sommation des actions locales : la valeur nulle de la résultante des forces de pression sur la paroi horizontale basse, la compensation des actions sur les parois verticales et l'effet nécessairement déséquilibré des forces de pression s'exerçant sur la paroi horizontale haute ne sont en effet pas apparus comme des obstacles lors des expérimentations réalisées à l'aide de cette figure, décrites ci-après.

Il est *très* courant, dans l'enseignement, d'ignorer tout ce débat, de proposer des énoncés sur les montgolfières comportant l'hypothèse discutée plus haut et de conduire ainsi les étudiants à l'utiliser sans autre

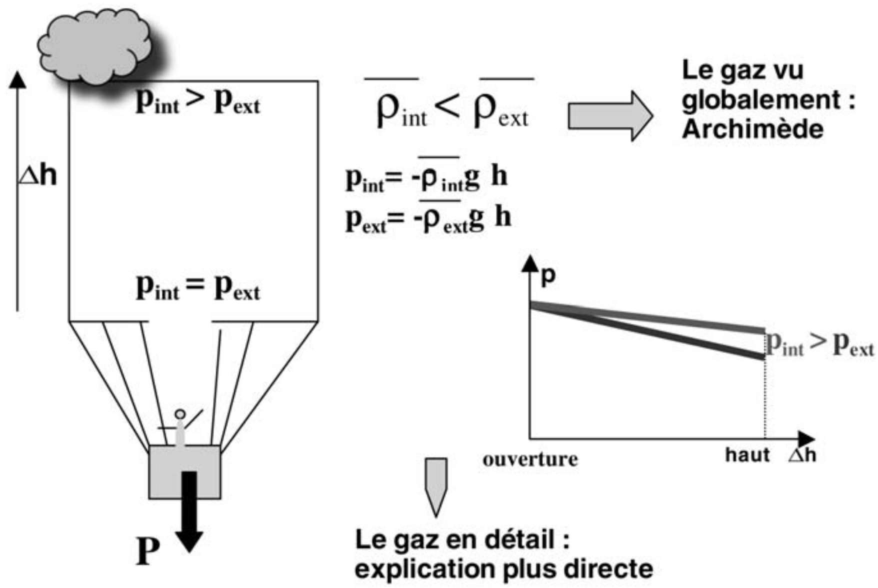


Figure 8 • **Éléments pour comprendre la sustentation d'une montgolfière**

questionnement pour aboutir, via le théorème d'Archimède, à la valeur cherchée de la température. Lors d'une étude récente (Viennot, 2005, 2006), sur 61 enseignants stagiaires en deuxième année d'IUFM, à qui il a été demandé par questionnaire écrit s'il modifieraient ou préciseraient la rédaction d'un tel exercice, *aucun* n'a détecté l'absurdité potentielle soulignée ici. 15 autres enseignants en stage de formation continue sur le thème des relations entre les mathématiques et la physique, n'ont pas davantage détecté l'hypothèse problématique. Par la suite, un travail de groupe proposant l'exposé oral de l'analyse résumée en figure 8, ils ont répondu positivement à une question écrite leur demandant s'ils pensaient que cette discussion valait la peine d'être menée (avec tous un indice de conviction de 3 ou 4 sur une échelle de 1 à 4). Cette unanimité disparaît pour la deuxième question concernant la valeur potentielle d'une telle discussion pour des étudiants de terminale S ou de première année universitaire. Une consultation d'étudiants en début de première année universitaire, dans le cadre de la même étude, éclaire ce point au moins pour ce niveau. Lors d'une série de 15 entretiens individuels d'une demi-heure, *tous* les étudiants concernés (qui eux non plus n'avaient pas critiqué l'hypothèse discutée ici) ont jugé cette discussion accessible et importante à mener malgré le temps qu'elle avait pris (environ une demi-heure). Un traitement équivalent pour des étudiants de licence (troisième année universitaire) a donné lieu au même jugement chez 18 des 21 étudiants présents, dont 17 ajoutaient, sur question explicite, y avoir pris un réel plaisir (coté 3 ou 4 sur une échelle de 1 à 4).

Ces éléments d'évaluation suggèrent qu'il vaut la peine de lier l'aspect local des interactions impliquant un élément de surface d'enveloppe à l'aspect global de la poussée. Paradoxalement, l'aspect local renvoie à l'extension et à l'inhomogénéité, et n'est pas dimensionnellement réducteur. En revanche, le calcul global sur la base d'une valeur moyenne de pression évoque ce que Besson (Besson, 2005, p. 447 ; Besson & Viennot, 2004) disait du gaz parfait : c'est le « point matériel de la thermodynamique ». En effet, on parle bien du volume de l'enveloppe pour calculer les masses de gaz en cause, le théorème d'Archimède est bien l'expression de la valeur d'une intégrale de surface. Mais si l'on pense la moyenne de la pression, utile pour le calcul des masses de gaz, comme s'étendant dans tout le volume concerné, celui-ci devient une étendue caractérisée par des valeurs uniques de grandeurs physiques intensives (ici pression, température), soit encore un ensemble de parties toutes équivalentes. Alors l'étendue du gaz perd une partie de sa pertinence physique, une fois perdue son inhomogénéité. On serait presque tenté de parler d'une « particule de volume V » comme on dit une « particule de masse m ». Bien entendu, on ne pourrait pas résoudre beaucoup de problèmes si on s'interdisait de prendre la moyenne de grandeurs physiques à telle ou telle fin, procédure la plupart du temps extrêmement fructueuse. Mais on arrive parfois, comme dans cet exemple, à l'absurde.

3. REMARQUES FINALES

Ces lignes s'attachent à remettre en examen des procédures courantes en physique et dont les enjeux sont usuellement peu explicités. Ces procédures qui impliquent à divers titres une réduction dimensionnelle, ou risquent d'y mener abusivement, sont très commodes pour beaucoup de calculs ou de constructions. De ce point de vue, il n'est pas si surprenant qu'elles apparaissent aux enseignants comme non problématiques.

Notons en tout cas qu'elles n'engagent nullement une quelconque vision de la matière constituant les objets étudiés, encore moins des préoccupations métaphysiques, des bannissements de principe du discontinu ou au contraire des appels à sa nécessité. Analyser une source lumineuse comme un ensemble de points ne préjuge en rien d'un modèle particulaire pour la matière émettrice ou diffusante. De même, parler de « particule de masse m » ne sous-entend pas une structure discontinue de la matière. L'homogénéité des gaz indûment supposée dans l'exercice sur la montgolfière engage peut-être un modèle particulaire chez ceux qui l'utilisent, mais c'est vers une sorte de particule géante que débouche volontiers le raisonnement.

Car c'est bien là toute l'affaire : dans ces pratiques réductrices, ce n'est pas tant la structure supposée de la matière que les facilités du raisonnement qui sont déterminantes. Au premier plan de ces facilités, il y a un flou confortable. Les points « A » et « B », compris au sens mathématique, permettent un traitement géométrique simple des « rayons » qui en proviennent, et pourtant ils sont autorisés à émettre de l'énergie. De même, la « particule de masse m » résume-t-elle sans doute, pour beaucoup, l'autorisation de calculer simplement les forces subies et leur somme vectorielle, sans pour autant qu'on lui attribue une densité infinie.

De façon plus conjecturale, il se peut qu'au-delà des facilités techniques, les pratiques réductrices évoquées plus haut rejoignent la plus fondamentale des tendances du raisonnement commun (Viennot, 1996) : se fonder sur l'idée d'objet quasi-matériel ou au moins géométriquement circonscrit, celui-ci étant aussi caractérisé par des valeurs bien définies de grandeurs physiques. De ce point de vue, ce qu'on désigne usuellement comme « un élément de surface dS » ne vaut pas un « point A », et en matière de valeur définie, le plus simple est de considérer la pression comme homogène. Comme d'autres tendances de raisonnement réputées communes, celle-ci ne saurait faire figure d'accusée en tant que telle : chercher à définir des objets d'analyse simples est une démarche naturelle et fructueuse. Ce que souligne ce texte, c'est l'intérêt d'en garder les avantages tout en surveillant de près les limites. Et justement, on aperçoit dans les exemples ci-dessus l'incroyable absence de vigilance où peuvent nous entraîner nos rituels d'enseignement.

Là où apparaissent bien clairement les difficultés, c'est tout particulièrement lorsque l'on se préoccupe de cohérence entre les points de vue : en optique, les questions d'énergie s'accommodent très mal de la vision pointilliste de l'objet ; en statique des fluides, la montgolfière risque d'apparaître stable ou en chute libre selon le point de vue adopté.

Sur le plan de l'éducation au raisonnement scientifique, le débat sur les réductions dimensionnelles explicites ou non, assumées ou non par l'enseignement, éventuellement subrepticement ajoutées par celui qui apprend, est sans doute une question vive si l'on s'attache à la cohérence de la théorie enseignée. Si, comme souvent, on attend surtout des élèves qu'ils mettent en œuvre des algorithmes classiques, les réflexions qui précèdent sont sans objet. Revenant à l'hypothèse inverse, les quelques éléments expérimentaux cités ici laissent penser que, lorsqu'on met en œuvre des pratiques d'analyse plus serrées, du moins plus explicites et maîtrisées, on peut observer que la quasi-unanimité des personnes concernées y trouvent intérêt et plaisir. Etant donné qu'il ne s'agit pas, dans l'exemple en question, d'un sujet sensationnel comme le big bang ou les techniques nanométriques, on peut émettre l'hypothèse que ce plaisir relève d'une satisfaction proprement intellectuelle.

Au-delà des interventions didactiques suggérées au fil de cet article, à propos de tel ou tel exemple, on peut voir dans le rassemblement qu'il propose des traces de plusieurs phénomènes qui méritent attention :

- le développement considérable qu'ont connu les études sur les conceptions et raisonnements des apprenants de tout niveau, depuis trente ans, ne doit pas conduire à penser que le champ des études sur les difficultés communes est clos. Il reste un risque fort (notamment chez les enseignants) d'inattention à ce propos ;
- pour certaines de ces difficultés, un tel risque peut être mis en rapport avec l'existence de rituels d'enseignement littéralement encastrés dans les pratiques communes. Cette idée est loin d'être neuve (voir en particulier les résultats du projet européen *Science Teacher Training in an Information Society* : Pinto, 2002 ; Hirn, 1998 ; Hirn & Viennot, 2000) mais il n'est pas pour autant simple de mesurer à quel point ces rituels affectent les divers acteurs impliqués dans le système éducatif, dont les enseignants et rédacteurs de textes d'orientation ou d'ouvrages scolaires, voire les chercheurs ; ceci à propos de contenus d'une déroutante banalité (l'image comme ensemble de points, plus lumineuse s'il arrive « plus de rayons » en chaque point image, la montgolfière dont les pressions interne et externe s'équilibrent à l'embouchure, etc.) ;
- dépassant la considération isolée de telle ou telle conception chez ceux qui apprennent, une catégorisation telle que celle proposée ici peut contribuer à guider une démarche de vigilance, d'analyse de difficultés et d'intervention didactique à propos de contenus très divers ;
- ce qu'il advient chez les enseignants après une éventuelle prise de conscience des points précédents, et tout particulièrement leur estimation des bénéfices escomptables pour leurs élèves, est en soi un sujet de recherche à développer. Les indices brièvement évoqués ici suggèrent que nombre d'entre eux sont peu confiants dans l'aptitude des élèves à bénéficier d'explicitations visant plus de cohérence, au prix d'un peu de temps. Cette observation mérite d'autant plus l'attention que des observations directes sur des étudiants mettent en question un tel pessimisme (Viennot, 2006).

Ces points sont actuellement objets de développements de recherche très différents. Il serait particulièrement utile que soient menées des études permettant d'évaluer le degré de généralité des quelques indications recueillies lors des expériences citées ici, qui concernent le contraste entre réactions d'étudiants et pessimisme d'enseignants sur les thèmes marqués par une forte ritualisation des pratiques.

BIBLIOGRAPHIE

BEATY W. (1987). The origin of misconceptions in optics ? *American Journal of Physics,* vol. 55, p. 872-13.

BERTIN M., FAROUX J.-P. & RENAULT J. (1986). *Optique et Physique Ondulatoire.* Paris : Bordas.

BESSON U. (2005). Le mésoscopique en physique et en didactique. *Bulletin de l'union des physiciens,* n° 873, p. 441-462.

BESSON U. & VIENNOT L. (2004). Using models at mesoscopic scale in teaching physics: two experimental interventions on solid friction and fluid statics. *International Journal of Science Education,* vol. 26, n° 9, p. 1083-1110.

BUTY C. (2004). Learning hypotheses and an associated tool to design and to analyse teaching-learning sequences. *International Journal of Science Education,* vol. 26, n° 5, p. 579-604.

COLMEZ F. & PARZYSZ B (1993). « Le vu et le su dans l'évolution de dessins de pyramides, du CE2 à la seconde ». In A. Bessot et P. Vérillon. *Espaces graphiques et graphismes d'espaces : contribution de psychologues et de didacticiens à l'étude de la construction des savoirs spatiaux.* Grenoble : Éd. La Pensée Sauvage, p. 35-55.

CRAWFORD F. (1968). Waves. *Berkeley Physics course,* vol. 3. New York : McGraw-Hill.

DE BROGLIE L. (1941). *Continu et discontinu en physique moderne.* Paris : Albin Michel.

FAWAZ A. & VIENNOT L. (1986). Image optique et vision. *Bulletin de l'union des physiciens,* n° 686, p. 1125-1146.

FEHER E. & RICE K. (1987). A comparison of teacher-students conceptions in optics. *Proceedings of the Second International Seminar: Misconceptions and Educational Strategies* in *Science and Mathematics,* Cornell University, vol. 2, p. 108-117.

FRANCE : ministère de l'Éducation nationale (2005). *Programme des collèges physique-chimie, classe de quatrième.* Hors série n° 5 du *Bulletin Officiel* du 25 août 2005, p. 51-60.

FRANCE : ministère de l'Éducation nationale (2000). *Programme de physique-chimie, classe de première, série scientifique.* Hors série n° 7 du *Bulletin Officiel* du 31 août 2000, p. 181-205.

FRANCE : ministère de l'Éducation nationale (2001). *Programme de physique-chimie, classe de terminale de la série scientifique.* Hors série n° 4 du *Bulletin Officiel* du 30 août 2001, p. 73-105.

FRANCE : ministère de l'Éducation nationale (2002). *Accompagnement des programmes de physique de la classe de première S.* Paris : CNDP.

FRANCE : ministère de l'Éducation nationale : groupe technique disciplinaire de physique (1992). *Document d'accompagnement du programme de quatrième.* Paris : ministère de l'Éducation nationale.

GALILI Y. & HAZAN A. (2000). Learners' Knowledge in Optics. *International Journal of Science Education,* vol. 22, n° 1, p. 57-88.

GIANCOLI D. (1993). *Physique générale 3 : ondes, optique et physique moderne.* Bruxelles : De Bœck.

GILBERT J., BOULTER C. & RUTHERFORD M. (1998) Models in explanations. *International Journal of Science Education,* vol. 20, n° 2, p. 187-204.

GOLDBERG F. & 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, p. 108-119.

GUESNE E. (1981). Un modèle qualitatif : la formation des images par une lentille convergente. *Bulletin de l'union des physiciens,* n° 630, p. 511-520.

GUIDONI P. (2005). A resonant-dynamics model to account for success and insuccess in understanding, motivation to understanding, mediation of unserstanding, key note address. *Contribution of Research to Enhancing Students' Interest in Learning Science.* Barcelone : ESERA.

HECHT E. (1987). *Optics.* Reading : Addison-Wesley.

HECHT E. (1999). *Physique.* Bruxelles : De Bœck.

HIRN C. & VIENNOT L. (2000). Transformation of didactic intentions by teachers: the case of geometrical optics in grade 8. *International Journal of Science Education,* vol. 22, n° 4, p. 357-384.

KAMINSKI W. (1989). Conceptions des enfants et des autres sur la lumière. *Bulletin de l'union des physiciens,* n° 716, p. 973-991.

KAMINSKI W. (1991). *Optique élémentaire en classe de quatrième : raisons et impact sur les maîtres d'une maquette d'enseignement,* thèse, université Paris 7.

KAMINSKI W. (1993). Rayons épinglés ou comment tracer les rayons lumineux en quatrième. Bulletin de l'union des physiciens, n° 750, p. 29-33.

MAURINES L. (2001). *Le raisonnement géométrique en termes d'objet dans la physique des ondes.* Note de synthèse pour l'habilitation à diriger des recherches, université Paris 11.

MAURY J.-P. (1987). *L'atmosphère.* Paris : Hachette.

MAY M. (1993). *Introduction à l'optique.* Paris : Dunod.

MENIGAUX J. (1991). Raisonnements des étudiants et des lycéens en mécanique du solide. *Bulletin de l'union des physiciens,* n° 738, p. 1419-1429.

PARZYSZ B. (1991). Representation of space and students' conceptions at high school level. *Educational Studies in Mathematics,* vol. XXII. Dordrecht : Kluwer, p. 575-593.

PINTO R. (2002). Introduction to the Science Teacher Training in an Information Society (STTIS) project. *International Journal of Science Education,* vol. 24, n° 3, p. 227-234. Disponible sur Internet : http://www.blues.uab.es/~idmc42 (consulté le 24 avril 2006).

RIGAUT M. & VIENNOT L. (2002). Réduire le centre d'inertie : jusqu'où ? *Bulletin de l'union des physiciens,* n° 841, p. 419-425.

TAYLOR R. (1994). *Colour in our lives: Master classes series.* London: Royal Institut.

VIENNOT L. (1996). *Raisonner en physique, la part du sens commun.* Bruxelles : De Bœck.

VIENNOT L. (2005). "Teaching rituals and students' intellectual satisfaction: What can we do ?" *Word View on Physics Education: International Conference Physics Education, university of New Delhi.* London: World Scientific Publishing, sous presse.

VIENNOT L. (2006). Teaching rituals and students' intellectual satisfaction. *Physics Education*, (à paraître en juillet 2006).

VIENNOT L. & KAMINSKI W. (2005). Can we evaluate a critical detail of teaching practice? The case of a diagram in optical imaging. *ESERA Conference, Barcelone* (à paraître dans *International Journal of Science Education,* disponible actuellement au LDSP, université Paris 7).

Cet article a été reçu le 07/11/2005 et accepté le 15/04/2006.