



HAL
open science

Les yeux des enfants sont-ils des “ porte-lumière ” ?

C. de Hosson, Wanda Kaminski

► **To cite this version:**

C. de Hosson, Wanda Kaminski. Les yeux des enfants sont-ils des “ porte-lumière ” ?. Bulletin de l'Union des Physiciens (1907-2003), 2002. hal-01663316

HAL Id: hal-01663316

<https://hal.science/hal-01663316>

Submitted on 15 Dec 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les yeux des enfants sont-ils des « porte-lumière » ?

par **Cécile de HOSSON** et **Wanda KAMINSKI**

LDSP - Université Denis Diderot Paris 7

75251 Paris Cedex 05

cdehosson@compaenet.fr

wapiokam@imaginet.fr

*Le chat ouvrit les yeux, le soleil y entra
Le chat ferma les yeux, le soleil y resta
Voilà pourquoi le soir, quand le chat se réveille,
J'aperçois dans le noir deux morceaux de soleil*

Maurice CARÊME

RÉSUMÉ

« *Le rayon visuel n'est pas le rayon lumineux* ». C'est par ces mots que Gérard SIMON conclut son ouvrage sur l'étude de l'optique dans l'Antiquité. C'est également par cette même phrase que nous souhaitons caractériser les idées que se font les enfants du mécanisme de la vision. Un regard croisé sur les représentations de la pensée pré-scientifique des enfants en optique et sur l'histoire de l'optique hellénique nous permet de conclure à une convergence entre les idées historiques et individuelles : celle d'une optique sans lumière telle que la physique la définit aujourd'hui.

Les yeux des enfants sont-ils des « porte-lumière » ?... Cette question mérite-t-elle vraiment que l'on s'y attarde ? Interrogeons notre bon sens, et la réponse semble aller de soi : à l'évidence, et à l'exclusion de Superman, ni les enfants, pas plus que leurs parents ou leurs chats, ne sont dotés de pouvoirs surnaturels conférant à leurs yeux une autonomie lumineuse et d'aucun ne peut prétendre qu'il en soit ainsi. Pourtant, au risque de surprendre, nous pensons qu'inspirée par les théories platoniciennes de la vision⁽¹⁾, l'expression « porte-lumière »⁽²⁾ convient pour qualifier la façon dont certains enfants imaginent leurs propres yeux : un agent actif, émettant quelque chose qui permet de voir. Une telle assertion semble extravagante. Mais pour qu'elle puisse aider l'enseignant des sciences physiques, il nous paraît nécessaire de montrer que, d'une part, la notion de lumière telle qu'elle est utilisée par Platon dans l'expression « porte-lumière » présente certaines similitudes avec la notion de lumière utilisée par la pensée pré-scientifique⁽³⁾ ;

(1) Voir plus loin p. 154.

(2) Traduction littérale du terme grec φωσφορα (lire phosphora), voir PLATON, *Timée*.

(3) Elle est ce qui permet de voir.

et que d'autre part, cette notion de lumière présente des différences notables avec le concept de lumière au sens où la physique le définit aujourd'hui et dont l'enseignement des sciences se nourrit.

1. LUMIÈRE ENTRE PENSÉE NATURELLE ET MODÈLE INSTITUTIONNEL

Loin de répondre aux exigences du modèle de l'enseignement (modèle que nous précisons plus avant), les représentations des élèves à propos de situations mettant en jeu la lumière, présentent donc des similitudes intéressantes avec certaines théories de l'optique de l'Antiquité. Nous souhaitons présenter deux investigations dans le domaine des représentations en optique : l'une individuelle ayant pour objet l'élève, l'autre historique. Nous verrons ainsi que les recherches en didactique des sciences convergent avec les analyses de l'historien des sciences de l'Antiquité vers une optique sans lumière (au sens actuel de la physique), et que les résultats réciproques de ces recherches sous-tendent, de fait, des processus de raisonnements très proches.

La littérature didactique foisonne de recherches sur les raisonnements des élèves en optique élémentaire⁽⁴⁾. Dans ce cadre, les caractéristiques essentielles des idées des élèves, telles qu'elles sont décrites par les chercheurs, font l'objet d'un consensus établi et reconnu. En effet, les didacticiens, quelles que soient leur origine et leur population d'étude (en France ou ailleurs), décrivent des difficultés identiques et convergent vers un ensemble caractérisé de recommandations à destination de la population enseignante. Notre propos n'est pas ici d'en extraire une liste exhaustive de difficultés ou de mécanismes de raisonnement, et encore moins d'énoncer une recette du « bien enseigner l'optique géométrique ». Sur ce dernier point, il apparaît que les programmes d'optique de collège ont subi, depuis 1992, l'influence explicite de la recherche en didactique⁽⁵⁾. L'enseignant y trouve exprimée une piste de travail sur « Lumière et vision » orientée à partir des trois principes suivants :

« Pour être vu, un objet doit envoyer de la lumière dans l'œil. Sauf accident, la lumière se propage en ligne droite. Un objet diffusant, éclairé en lumière blanche, renvoie de la lumière dans toutes les directions »⁽⁶⁾.

Ces trois principes sont complétés, par l'introduction du phénomène de la diffusion (responsable du renvoi de la lumière par les sources secondaires) et par une présentation des sources primaires de lumière (au programme depuis des décennies).

Comme nous le constatons, le concept de lumière est au cœur des programmes de collège de 1992 et de 1998. On s'attendrait donc à ce que les élèves fassent de la lumière définie par les programmes, un outil de raisonnement à la fois indispensable et efficace

(4) Nous nous référons en particulier aux travaux de FEHER et RICE, FAWAZ, VIENNOT, GOLDBERG et McDERMOTT, TIBERGHEN, GUESNE, KAMINSKI, GALILI.

(5) Voir VIENNOT, Recherche en didactique et nouveaux programmes : convergences, in *Didaskalia*, n° 3, 1994, p. 125-136.

(6) Extrait du BO n° 10 du 15 octobre 1998.

dans des situations d'enseignement, et plus généralement, qu'ils emploient cet outil pour expliquer la vision ou la formation des images optiques. Les enjeux d'une telle attente dépassent de loin ce qui relèverait de l'unique mais légitime satisfaction enseignante, celle du devoir accompli. Nous le savons tous, l'entreprise est plus ambitieuse. Il s'agit de doter les élèves des bons outils, de les amener à s'en servir correctement pour être ainsi capables d'expliquer rationnellement le monde qui les entoure, ce que le sens commun ne parvient pas toujours à faire, loin s'en faut ! Ainsi, proposer un enseignement centré avant tout sur la lumière semble une solution prometteuse. Car même s'il n'en fut pas toujours ainsi, l'optique est aujourd'hui la science de la lumière. Et l'un des objectifs conceptuels à atteindre par nos élèves est qu'ils distinguent la lumière de « tous les jours », celle qui « se voit », qui éblouit, qui éclaire, de la lumière conceptualisée, celle qui « ne se voit pas de profil »⁽⁷⁾ (même si ses sources, elles, éblouissent et éclairent).

Si les efforts didactiques entrepris portent essentiellement sur la nécessité de la construction et de la maîtrise du concept physique de lumière, c'est qu'il n'est pas naturel, pour la pensée pré-scientifique, de faire appel (de façon judicieuse) à ce concept pour expliquer la vision ou la formation des images optiques. En d'autres termes, le concept de lumière n'est pas un outil opérationnel dans les mécanismes de la pensée naturelle. Et ce qui est plus préoccupant c'est qu'en dépit des impulsions didactiques sur les programmes scolaires et des multiples recherches, les raisonnements de la pensée naturelle résistent effrontément aux tentatives de déstabilisation censées être opérées par l'enseignement scientifique : le concept de lumière n'est pas non plus opérationnel chez des élèves ayant reçu un premier enseignement d'optique géométrique. Et dans certaines situations, cette résistance perdure jusqu'après l'enseignement supérieur⁽⁸⁾.

L'insolence d'une telle obstination nous amène à interroger l'histoire de l'optique, celle de l'Antiquité plus particulièrement. En effet, comme nous le suggèrent Edith SALTIEL et Laurence VIENNOT, la persistance dans l'histoire d'une théorie ultérieurement dépassée donne une idée assez fiable de la résistance des mécanismes de raisonnement d'élèves⁽⁹⁾. Ainsi, même si elle fut pratiquée par les Grecs, nous verrons plus avant que l'optique n'est devenue science de la lumière qu'à partir du XI^e siècle, avec l'essor de l'optique arabe, celle d'Ibn al Haytham en particulier. Il ne fut pas facile au concept de lumière de prendre place dans l'histoire de l'optique. Cette singularité semble analogue à ce que nous observons dans les raisonnements de nos élèves. Mais avant de présenter une investigation historique et d'y confronter les difficultés des élèves, nous souhaitons

(7) Edith SALTIEL et Wanda KAMINSKI ont souligné à quel point l'idée d'une visibilité de la lumière « de profil » constituait une difficulté majeure et persistante dans les représentations et dans les raisonnements des élèves, même après un enseignement d'optique.

Voir SALTIEL et KAMINSKI, Un exemple d'évaluation des nouveaux programmes : problèmes liés à l'évaluation elle-même et à la formation des maîtres. *Bull. Un. Phys.*, juillet-août-septembre 1996, vol. 90, n° 786, p. 1271-1287.

(8) Voir entre autres, KAMINSKI (1989 et 1991), GALILI (1996)...

(9) SALTIEL et VIENNOT, « What do we learn from similarities between historical ideas and the spontaneous reasoning of students ? », in GIREP, Utrecht, 1985.

revenir sur quelques caractéristiques ciblées de raisonnements d'élèves (ayant ou non reçu un enseignement d'optique) à propos du rôle de la lumière dans la vision et dans la formation d'images.

2. LUMIÈRE, IMAGE ET VISION : UN POINT SUR LES RAISONNEMENTS DES ÉLÈVES

Nous construirons notre argumentation à partir d'enquêtes personnelles effectuées sur des enfants et sur des élèves de collège. Celles-ci vont nous permettre de savoir si d'une part, les enfants expliquent la vision par une émission de lumière depuis l'œil, et si d'autre part, les élèves utilisent la lumière comme moyen de transport d'une image. Afin de compléter notre investigation, nous proposons d'examiner certaines réponses d'enfants citées par d'autres chercheurs, qui se sont posés d'autres questions mais qui ont recueilli des données exploitables selon nos propres critères d'investigation. De ces données déjà existantes dans la littérature didactique nous souhaitons extraire des mécanismes de raisonnement dont l'objet ne fut pas nécessairement celui des questionnements de ces chercheurs. Ces derniers se sont appliqués à dépister les traces laissées par la notion de lumière dans les idées de leurs jeunes interlocuteurs, et furent guidés par une orientation de recherche spécifique et distincte de la nôtre.

2.1. Lumière, vision et raisonnements spontanés

Les conceptions des enfants sur la lumière ont fait l'objet de recherches dont les résultats sont tout à fait passionnants et que nous rappelons ici⁽¹⁰⁾. Il ressort en particulier que « certains enfants assimilent la lumière à sa source ou à ses effets »⁽¹¹⁾. Les expressions « allume la lumière », « éteins la lumière » dans lesquelles le mot « lumière » désigne sans doute une lampe, ne renforcent-elles pas cette assimilation ? En outre, les enfants « ne soupçonnent pas le renvoi de la lumière par les objets »⁽¹²⁾. Dans le cadre de la vision, la plupart des enfants limitent le rôle de la lumière à sa seule présence : si elle demeure essentielle pour voir, aucune indication ne nous est apportée sur le comment de la chose ; ou bien l'œil reçoit directement une « image » de la part de l'objet, ou bien l'œil lui-même est actif dans le processus et envoie quelque chose qui permet de voir. Le vocabulaire utilisé par ces enfants recouvre des termes tels que « le regard », « la vue », dont la nature n'est jamais précisée (*cf.* figure 1 ci-contre).

En tout état de cause, lorsque la vision est expliquée par l'activité de l'œil dans les représentations pré-scientifiques, nous avons l'idée qu'elle n'est pas, dans celles-ci, une émission de lumière depuis l'œil vers l'objet. Arrêtons-nous quelques instants sur la

(10) Voir en particulier, les travaux de TIBERGHIE (1983), de GUESNE (1984) et de KAMINSKI (1989).

(11) Voir GUESNE, les Conceptions des enfants sur la lumière, *New trends in physics teaching*, vol. 4, UNESCO, 1984.

(12) GUESNE, *Ibid.*

"Comment voit-on les objets qui nous entourent ?"

Réponses d'élèves de cinquième, collège Claude Debussy (Aulnay sous Bois, 93).

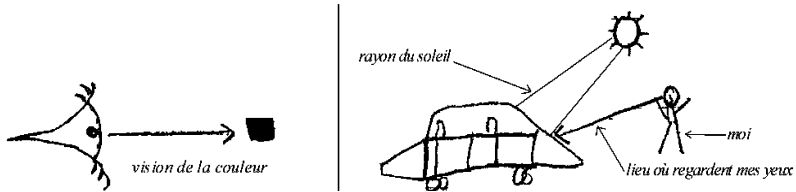


Figure 1 : Les commentaires qui figurent sur les schémas sont la transcription dactylographiée des légendes écrites par les élèves. Aux vues de ces commentaires, nous avons des raisons de penser que les flèches issues de l'œil ne représentent pas la lumière au sens actuel de la physique. D'ailleurs, sur le dessin de droite, les « rayons du soleil » ne sont pas représentés de la même manière que le « lieu où regardent mes yeux »...

phrase de cet enfant interrogé par Edith GUESNE pour expliquer la vision :

« Ça c'est mes yeux qui peuvent aller jusqu'à la boîte. C'est ma vue. Si la boîte est à quinze kilomètres je ne pourrai pas la voir, parce que ma vue est pas assez forte »⁽¹³⁾.

Cette réponse d'enfant présente un double intérêt : ainsi, conformément à ce qu'en dit GUESNE, nous pensons qu'« il apparaît ici un modèle de la vision, où l'œil n'est pas récepteur mais agent actif »⁽¹⁴⁾. Mais nous y voyons aussi autre chose : le vocabulaire utilisé par l'enfant (« la vue ») ne représente pas la lumière, ni au sens actuel de la physique, ni dans son acception commune de ce qui est émis par les sources primaires. Cette approche va dans le sens de l'interprétation que nous donnions plus haut des commentaires accompagnant les dessins des élèves d'Aulnay-sous-Bois (cf. figure 1). Et nous verrons plus avant, que cette explication enfantine de la vision est plus proche de la théorie platonicienne qu'elle n'y paraît *a priori*.

Lorsque les enfants expliquent la vision par une émission de l'œil, nous pouvons nous attendre à ce que celle-ci ne soit pas une émission de lumière. En d'autres termes, les enfants ne considèrent pas leurs yeux tels des phares de voitures. Les rédacteurs des programmes de 1985 se trompaient donc de cible lorsqu'ils invitaient les enseignants à modifier, dans les processus spontanés de raisonnements des élèves, le sens de propagation de la lumière :

« Il convient d'insister sur le sens de propagation de la lumière afin de supprimer l'idée fautive, encore ancrée dans l'esprit de certains élèves, d'un cheminement à partir de l'œil »⁽¹⁵⁾.

Comme nous l'avons dit en introduction, il semble difficile d'imaginer qu'un enfant puisse bâtir un raisonnement selon lequel la lumière « sort » de ses yeux et que c'est

(13) Voir GUESNE, les Conceptions des enfants sur la lumière, *New trends in physics teaching*, vol. 4, UNESCO, 1984.

(14) Guesne, *Ibid.*

(15) BO n° 44 du 12 décembre 1985.

grâce à cela qu'il voit. Il construit donc un système d'explications, incommensurable⁽¹⁶⁾ avec le modèle théorique, dans lequel la lumière est certes présente (puisqu'on ne voit pas dans le noir) mais n'est pas caractérisée comme véhiculant l'information visuelle jusqu'à l'œil, pas plus qu'elle n'agit depuis l'œil. Le concept physique actuel de lumière demande un degré d'abstraction tel qu'il échappe aux mécanismes d'élaboration guidés par la pensée naturelle. Et puisque pour voir (en vision directe) il est nécessaire que l'objet et l'œil soient « face à face », il n'est guère surprenant que la vision soit expliquée dans certains cas comme le résultat d'une activité de l'œil⁽¹⁷⁾, activité dont l'agent (le regard, la vue) est rendu opérationnel par la présence de la lumière mais n'est pas la lumière elle-même. Ce que cet élève de troisième résumait parfaitement en disant : « La lumière attire le regard »⁽¹⁸⁾, corroborant ainsi les explications recueillies par GUESNE :

« Les yeux ils n'ont pas de lumière propre, alors ils sont obligés d'avoir une lumière qui éclaire ce qu'on peut voir »⁽¹⁹⁾.

Dans un souci de synthèse et/ou de simplification, certains enseignants interprètent ces explications d'élèves en effectuant un glissement subreptice du raisonnement « œil comme agent actif », vers l'interprétation « œil comme émetteur de lumière ». Pourtant, si une fois encore nous prenons le concept de lumière au sens de la physique (et même dans le sens restrictif de ce qui est émis par les sources primaires), rien ne nous permet d'affirmer que les enfants expliquent la vision en inversant le sens de propagation de la lumière. Une telle interprétation nous paraît abusive, elle ne reflète guère les idées exprimées par ces enfants et néglige, de fait, tout un ensemble de processus de raisonnement sous-jacent.

2.2. Lumière, image et raisonnements spontanés

Outre la vision, si l'on demande à des élèves ayant bénéficié d'un enseignement en optique géométrique, de raisonner sur des situations mettant en jeu le principe de formation d'image par une lentille convergente, les réponses laissent apparaître des explications dans lesquelles les rôles respectifs de la lumière, de la lentille et de l'œil sont loin d'être conformes au modèle théorique⁽²⁰⁾. Il nous semble inutile de revenir sur toutes les

(16) Le terme « incommensurable » est utilisé ici dans le sens défini par Thomas KUHN dans *La structure des révolutions scientifiques* (1970). Ainsi, une théorie est dite incommensurable à une autre lorsqu'elle utilise de nouveaux concepts ou des concepts anciens dotés d'un rôle nouveau. KUHN précise dans les cas de deux théories incommensurables, « les deux partis voient de manière différente les situations auxquelles il font tous deux appel » et ce faisant puisque « le vocabulaire dans lequel ils discutent se compose des mêmes termes, ils doivent établir entre ces termes et la nature, un rapport différent » (cf. KUHN, p. 269).

(17) La langue française n'est d'ailleurs pas exempte d'expressions allant dans le sens de telles représentations. Ne dit-on pas communément : « jeter un œil », « lancer un regard », etc. Ces expressions ne mettent nullement en jeu la lumière même si elles attribuent un rôle actif à l'œil dans la vision.

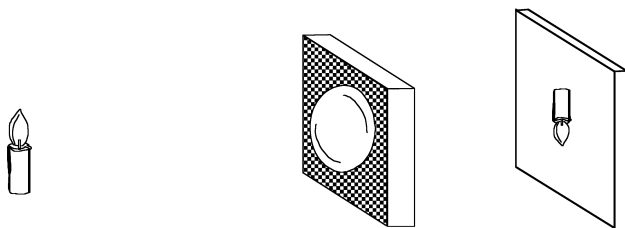
(18) Réponse d'un élève de troisième du collège Claude Debussy d'Aulnay-sous-Bois (Seine-Saint-Denis) à la question suivante : « comment expliques-tu la vision ? », enquête personnelle d'avril 2001.

(19) Enfant E12 interrogé par GUESNE, *Ibid.*

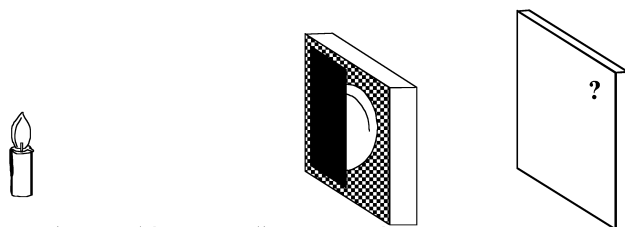
(20) Voir MISTRIOTI (1997), DE HOSSON (1998).

situations expérimentales ayant servi de support aux nombreuses investigations passées⁽²¹⁾. En revanche, nous souhaitons présenter le bilan d'une enquête réalisée en 1998 auprès d'élèves de collèges, en nous intéressant uniquement à la situation classiquement nommée : question de la « moitié de la lentille »⁽²²⁾. Nous allons voir que les résultats corroborent ceux des recherches précédentes, dans le sens d'une notion de « lumière »⁽²³⁾ peu ou mal utilisée. L'énoncé de la question « moitié de la lentille » est présenté figure 2.

Soit une lentille sur son support et un écran sur lequel on observe l'image de la bougie donnée par la lentille.



On pose sur la moitié de la lentille un cache en carton noir.



Que voit-on sur l'écran ? Expliquez votre réponse.

Figure 2 : Énoncé de la question « moitié de la lentille ».

(21) Voir notamment FAWAZ et VIENNOT (1985), GOLDBERG et McDERMOTT (1987), FEHER et RICE (1987), GALILI (1991 et 1996), KAMINSKI et MISTRIOTI (2000).

(22) Cette enquête fut réalisée dans le cadre d'un mémoire de tutorat sur un échantillon de 114 élèves issus de cinq classes de collèges ZEP (Zone d'éducation prioritaire) de Seine-Saint-Denis et d'une classe d'un collège des Yvelines.

Voir HOSSON (de), *La formation d'une image par une lentille convergente dans les programmes de 1992 : éléments d'un bilan concernant les raisonnements des élèves*, mémoire de tutorat (Tuteur : KAMINSKI), LDSP - Université Denis Diderot Paris 7, 1998.

(23) L'utilisation des guillemets nous permet de distinguer le concept physique de lumière, du modèle « lumière » tel qu'il est élaboré et utilisé par les élèves et qui ne correspond pas au modèle du physicien.

Sur la figure 3, nous présentons le schéma expliquant le fait que cacher une partie de la surface de la lentille ne fait pas disparaître une partie de l'image.

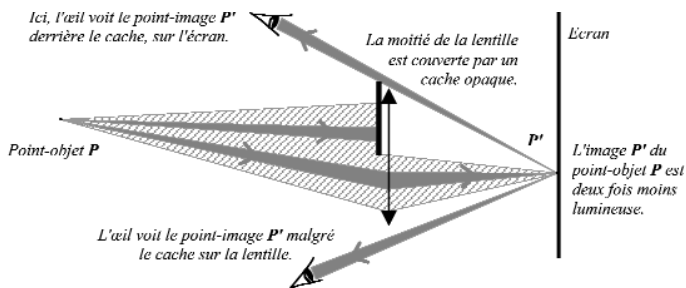


Figure 3 : Schéma pour expliquer la formation, par une moitié d'une lentille convergente, d'un point-image P' correspondant à un point-objet P . Sur l'écran, le point image P' est deux fois moins lumineux.

Comme on peut s'y attendre, plus des trois quarts des élèves interrogés estiment que le cache affecte l'image en partie ou la fait disparaître.

Qu'elles soient ou non conformes au modèle du physicien, les réponses obtenues permettent d'identifier le rôle joué par la lumière dans les explications des élèves lorsque celle-ci est utilisée comme outil de raisonnement (ce qui est le cas dans un tiers des réponses). Dans le meilleur des cas, la « lumière » est vue comme un ensemble de rayons dont chacun a la responsabilité de guider une image déjà prête (ou une partie de celle-ci) depuis l'objet, vers un objectif prédéfini. Nous baptisons un tel mode de pensée du nom de « raisonnement en lumière-rail ». En voici une illustration :

« On ne verra que la moitié de l'image car le cache noir est opaque, ce qui empêche la lumière de l'autre moitié de la bougie d'être projetée sur l'écran. »

Cette réponse va dans le sens de celles relevées par KAMINSKI et MISTRIOTI à cette même question de la « moitié de la lentille ». En particulier, l'explication ci-dessous fait remarquablement écho à la précédente :

« On voit la moitié de la bougie à l'envers, car les rayons lumineux sont arrêtés par le cache noir, donc une partie passe »⁽²⁴⁾.

Là encore, nous pouvons apporter une dimension supplémentaire à l'interprétation que les auteurs ont donnée de cette réponse, interprétation que nous rappelons : « la lumière émise par la bougie, passant par une moitié de la lentille (ne pouvant pas passer par l'autre moitié à cause du cache), contribue à former une partie de l'image »⁽²⁵⁾. En effet, nous voyons également dans cette réponse d'élève, un « raisonnement en lumière-rail » : une partie des rayons lumineux accompagne la moitié de l'image. Notre appellation « raisonnement en lumière-rail » complète le modèle du raisonnement en « image-

(24) KAMINSKI et MISTRIOTI, Optique au collège : le rôle de la lumière dans la formation d'image par une lentille convergente. *Bull. Un. Phys.*, avril 2000, vol. 94, n° 823, p. 757-784.

(25) KAMINSKI et MISTRIOTI, *Ibid.*

voyageuse »⁽²⁶⁾, repéré par les chercheurs et très largement utilisé par les élèves (appelé également par certains chercheurs « modèle holistique »⁽²⁷⁾). Laissons Laurence VIENNOT nous rappeler les caractéristiques de ce raisonnement :

« Une image est formée dès le départ, et se promène en bloc, quitte à laisser quelques morceaux en chemin si un obstacle l'a écornée au passage »⁽²⁸⁾.

Si l'image part en voyage depuis l'objet, ajoutons qu'elle utilise parfois la lumière (ou ses rayons) comme moyen de transport. Ce type de raisonnement intervient la plupart du temps après un premier enseignement d'optique. Ainsi, les élèves incorporent à leurs explications spontanées des éléments de l'enseignement. Cet enseignement peut donc faire évoluer les raisonnements des élèves en substituant au modèle holistique de la physique pré-scientifique un autre modèle, mélange de raisonnements spontanés et d'éléments formels adaptés dans lequel la « lumière » (ou le rayon lumineux) agit tel un rail de transport. Ce type de raisonnement n'est bien entendu pas conforme à celui du physicien, il demeure un modèle intermédiaire entre la pensée de la physique naïve et celle du savant. Igal GALILI a montré que l'introduction du concept de lumière effectué par l'enseignement dans les raisonnements pré-scientifiques engendrait un modèle de pensée intermédiaire « hybride »⁽²⁹⁾. Cependant, le modèle de GALILI nous semble déjà très élaboré : selon ce modèle, un seul rayon lumineux issu d'un point objet suffit à former un point image. Même si ce mode de raisonnement est plus conceptualisé que celui de nos élèves d'Aulnay-sous-Bois⁽³⁰⁾, nous ne pouvons nous empêcher de penser que là encore,

D'après Feher et Rice (1987)

Une croix lumineuse est placée devant un trou de diamètre comparable à la taille de la croix (25cm). On demande à un enfant de dessiner ce que l'on verra sur un écran placé après le trou. Feher et Rice ont reconstitué la prévision de certains enfants à l'aide de la représentation suivante :

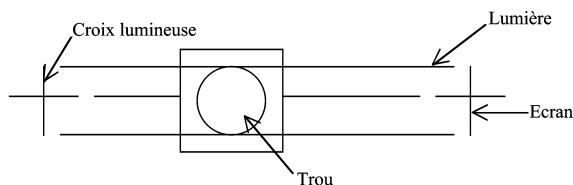


Figure 4 : Certains enfants interrogés par FEHER et RICE prévoient que la croix lumineuse se déplace d'un bloc vers l'écran. Nous pensons que la « lumière » figurée par les traits sur le schéma, permet le déplacement de cette croix jusqu'à son objectif, et que, là encore, nous pouvons risquer une interprétation de « raisonnement en lumière-rail ».

(26) GOLDBERG et McDERMOTT, « An investigation of student's understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror », *American journal of physics*, 1987, n° 55, p. 108-119.

(27) Voir notamment GALILI (1991 et 1996).

(28) VIENNOT, *Raisonnement en physique, la part du sens commun*. De Boeck, Paris-Bruxelles, 1996, p. 39.

(29) Igal GALILI, « Student's conceptual change in geometrical optics », *International journal of science education*, 1996, vol. 18, n° 7, p. 847-868.

(30) Les programmes de collège ne prévoient pas de décomposer l'objet et l'image en un ensemble conceptualisé de points lumineux.

la lumière agit tel un rail ; simplement, au lieu de transporter une image en entier, elle en transporte une infime partie par l'intermédiaire de l'un de ses rayons, dans une direction privilégiée.

FEHER et RICE ont également décelé des raisonnements dans lesquels nous avons des raisons de penser qu'une image, déjà existante depuis l'objet, est accompagnée par la « lumière »⁽³¹⁾ (cf. figure 4).

Dans cet exemple, il semble que la « lumière » soit considérée par les enfants interrogés par FEHER et RICE, comme un rail aux fonctions identiques à celles qu'utilisent nos élèves d'Aulnay-sous-Bois.

Les rails sont parfois si bien conçus qu'ils permettent à l'image de se diriger où bon lui semble, quitte à contourner un obstacle qui contrarierait son chemin, ou au contraire, à se précipiter à corps perdu vers lui, comme nous le précisons ces élèves (en réponse à la question de la « moitié de la lentille ») :

« On verra l'image en entier, mais décalée car le cache déplace la lumière un peu vers la gauche ».

« Puisque la lumière va vers le cache et que celui-ci est noir alors il absorbe la lumière et on ne verra rien sur l'écran ».

Comme nous venons de le voir, si la lumière est parfois utilisée comme outil de raisonnement, cela ne permet pas forcément à l'élève de mettre en œuvre des raisonnements conformes au modèle physique. Cette affirmation va dans le sens de ce que de nombreux chercheurs en didactique ont déjà montré⁽³²⁾. Toutefois, nous avons des raisons de penser que dans certaines idées exprimées par les enfants et relevées par les chercheurs, la « lumière » peut également être vue comme un rail, dirigeant une image déjà prête à aller là où il faut (vers un cache, ou vers un écran). Dans de telles situations, la « lumière » accompagne l'image (ou une partie de celle-ci) vers un objectif prédéfini, mais ne participe pas à sa formation.

D'une façon tout à fait générale, la pensée naturelle résiste très fortement à la mise en place de concepts relevant de processus d'abstraction complexes. Le concept de lumière, tel que la physique le définit, constitue l'un de ceux-ci. Les raisonnements spontanés se dispensent donc de cet outil conceptuel tel que la rationalité le définit aujourd'hui et en proposent parfois une adaptation fonctionnelle pour expliquer la vision et les images optiques. L'optique pré-scientifique n'est donc pas une science de la lumière. Dans la pensée du sens commun, la lumière est utilisée à des fins utilitaires : rendre le regard opérationnel, et/ou transporter les images. Voyons maintenant comment se définissait l'optique de l'Antiquité.

(31) FEHER et RICE, « Pinholes and images : children's conceptions of light and vision », in *Science Education*, 1987, n° 71, p. 629-639.

(32) Voir en particulier, FEHER et RICE, FAWAZ et VIENNOT, GOLDBERG et McDERMOTT, GALILI, KAMINSKI.

3. LUMIÈRE, IMAGE ET VISION DANS L'OPTIQUE DE L'ANTIQUITÉ

Il est communément admis que les savants de l'Antiquité posèrent les bases fondamentales de l'optique en proposant la notion de rayon comme modèle géométrique de la lumière. Cette idée est plus un raccourci qu'une réalité historique. Gérard SIMON dans son ouvrage *Le regard, l'être et l'apparence* nous livre une analyse originale sur l'optique de l'Antiquité à partir d'une étude détaillée des auteurs qui marquent sa naissance et son apogée, Euclide et Ptolémée⁽³³⁾. Il établit ainsi que l'optique des anciens est la science de la vision et non celle de la lumière. Il n'hésite pas à dénoncer les extrapolations abusives réalisées avant lui par certains auteurs qui assimilent le rayon euclidien ou « rayon visuel » au rayon lumineux. Nous avons nous même rencontré de telles confusions au fil de nos lectures. À titre d'exemple Bernard MAITTE nous propose la formule suivante à propos des travaux d'Euclide :

« Euclide vient de créer un concept nouveau, celui du rayon lumineux, filet élémentaire de lumière »⁽³⁴⁾.

En fait, le système de concepts sur lequel l'optique de l'Antiquité se fonde est totalement différent du système conceptuel de l'optique actuelle. Il demeure intransposable à la science d'aujourd'hui. Les questions que se sont posées les savants de l'Antiquité ne sont pas celles auxquelles l'optique actuelle apporte des réponses : l'optique de l'Antiquité est la science de la vision, une analytique du regard, guidée par un environnement philosophique particulier, et non une science de la lumière telle qu'elle l'est devenue par la suite.

Dans ce contexte, plusieurs théories coexistent. À la lumière de l'ouvrage de Vasco RONCHI, nous en retiendrons trois⁽³⁵⁾. La première est celle des atomistes qui, selon les idées développées par LEUCIPPE et DÉMOCRITE, se déclarent favorables à la thèse d'une émission dirigée de l'objet vers l'œil. LUCRÈCE parle d'écorces émises depuis l'objet vers l'œil :

« Je dis que les choses envoient de leur surface des effigies, formes tenues d'elles-mêmes, des membranes en quelque sorte ou des écorces, puisque l'image revêt l'aspect, la forme exacte de n'importe quel corps dont, vagabonde, elle émane »⁽³⁶⁾.

La deuxième est celle des pythagoriciens qui avancent l'idée d'une émission depuis l'œil vers l'objet. Euclide défend activement cette théorie et propose un modèle géométrique de la vision qui sera repris et complété par Ptolémée.

« On voit ce sur quoi tombent les rayons visuels, on ne voit pas ce sur quoi ils ne tombent pas »⁽³⁷⁾.

(33) SIMON, *Le regard, l'être et l'apparence*. Paris : Seuil, 1988.

(34) MAITTE, *La lumière*. Paris : Seuil, 1981, p.17.

(35) Notre revue historique serait complète si l'on y ajoutait les théories aristotéliennes de la vision (voir ARISTOTE, *De l'Âme*, livre II, Paris : Les Belles Lettres, 1989, p.57-65) qui semblent s'approcher le plus de notre physique actuelle (et s'éloignent, de fait, des représentations individuelles pré-scientifiques). De façon tout à fait surprenante, ces théories ont été abandonnées par la suite, au profit des trois que nous nous proposons de résumer.

(36) LUCRÈCE, *De Rerum Natura*, Les Belles Lettres, 1920.

(37) EUCLIDE, *Optique*, cité par SIMON, *Ibid.*, p. 21.

La troisième, enfin, tente une combinaison des deux émissions. PLATON exprime la nécessité d'un agent externe qui part de l'objet et va vers l'œil et d'un agent interne « feu visuel » projeté hors de l'œil pour donner vie et consistance à l'objet vu. C'est sans doute lui qui, dans *Timée*, a le mieux exprimé la parenté qui unit notre regard à la lumière :

« Les premiers organes qu'ils [les dieux] fabriquèrent furent les yeux porte-lumière ; ils les fixèrent sur le visage dans le but que je vais dire. De cette sorte de feu qui a la propriété de ne pas brûler et de fournir une lumière douce, ils imaginèrent de faire le propre corps de chaque jour, et le feu pur qui est en nous, frère de celui-là, ils le firent couler par les yeux en un courant de parties lisses et pressés. (...) Lors donc que la lumière du jour entoure le courant de la vision, le semblable rencontre le semblable et se fond avec lui pour former, dans la direction des yeux un seul corps, partout où le rayon sorti du dedans frappe un objet qu'il rencontre à l'extérieur. (...) Mais quand le feu parent du feu intérieur se retire à la nuit, celui-ci se trouve coupé de lui ; comme il tombe sur des êtres d'une nature différente, il s'altère lui-même et s'éteint... »⁽³⁸⁾.

Ne nous y trompons pas, cette dernière théorie de la vision, n'est pas une théorie de l'émission de la lumière par l'œil : les yeux de Platon ne sont pas des flambeaux. La terminologie optique de l'époque ne va pas dans le sens d'un unique terme désigné sous le nom de « lumière ». Et s'il existe bien une communauté de nature du « feu intérieur » platonicien avec la lumière, ce feu ne lui est pas identique puisque à la nuit tombée, il ne prend pas le relais de « la lumière du jour », au contraire, « il s'altère et s'éteint ».

Quelle que soit la théorie retenue, l'émission dont il est question n'est pas identifiée à la lumière. Afin d'éviter toute confusion possible, RONCHI nous propose dès les premières pages de son ouvrage, d'associer le mot latin *quid* à la liaison pouvant exister entre l'œil et la chose vue :

« Ainsi au ^ve siècle [avant J.-C.] ce mode de communication entre l'œil et l'objet vu était-il considéré, très justement, comme l'une des solutions possibles : on pouvait en effet penser à une liaison à l'aide d'un “quid” qui, sortant de l'œil, allait vers l'objet vu, ou d'un “quid” qui, de la chose vue, allait vers l'œil, ou enfin, à une coexistence des deux «quid», en sens inverse l'un de l'autre »⁽³⁹⁾.

Ainsi, il n'est pas possible d'assimiler, ni même de rapprocher le « quid » employé par RONCHI, du concept scientifique moderne de lumière⁽⁴⁰⁾. Quant à la géométrisation euclidienne, elle concerne exclusivement le phénomène de la vision. Dire qu'EUCLIDE propose un modèle géométrique du concept physique de lumière au sens actuel paraît relever d'un anachronisme. Si modèle géométrique il y a, c'est bien un modèle de la vision, non de cette lumière-ci.

Enfin, en ce qui concerne la réfraction largement étudiée par PTOLÉMÉE et dont Simon se fait l'analyste rigoureux, elle est présentée comme la rupture du regard sur un

(38) PLATON, *Timée*.

(39) RONCHI, *Ibid.*, p. 4.

(40) En revanche, il est tout à fait envisageable (et c'est bien ce que nous entendons montrer) de rapprocher le *quid* de la notion pré-scientifique de lumière.

objet qui conduit à voir cet objet où il n'est pas. La réfraction serait donc dans le contexte de l'Antiquité, une véritable « pathologie du regard »⁽⁴¹⁾.

« Rien dans la manière de décrire le phénomène ne recoupe notre notion d'image réfractée : l'objet est simplement vu en un autre lieu que le sien »⁽⁴²⁾.

La lumière, telle qu'elle est conceptualisée dans l'optique de l'Antiquité, est définie par sa fonction de rendre opérant le regard, autrement dit, de rendre visible le visible. Ceci ne correspond en rien à notre physique actuelle. L'optique de l'Antiquité obéit à des contingences imposées par une logique interne de pensée philosophique. Malgré le caractère intransposable de ses concepts, elle s'organise de manière cohérente autour d'une analytique du regard, et développe des processus de raisonnements identifiables. Ce terme « lumière » renvoie donc à des concepts incommensurables entre eux. Cette incommensurabilité est remarquable entre l'optique de l'Antiquité et celle de la période contemporaine, mais elle l'est aussi entre l'optique pré-scientifique et l'optique du physicien (même si elles sont toutes deux contemporaines l'une de l'autre...). Mais qu'en est-il de l'optique de l'Antiquité et de l'optique pré-scientifique ? Les concepts développés par ces deux optiques sont-ils réellement incommensurables ?

4. RECHERCHE EN DIDACTIQUE ET HISTOIRE DE L'OPTIQUE : CONVERGENCES

Il manque à l'optique de l'Antiquité le concept de lumière qui fait également défaut à la pensée individuelle pré-scientifique. Et quoi qu'on en dise, toutes les variantes mettant en jeu une émission issue de l'œil, ne présentent pas cette émission comme de la lumière au sens de la physique actuelle (même si l'on considère uniquement l'émission des sources primaires). Voilà une constatation qui mérite que l'on s'y arrête : l'optique de l'Antiquité aurait ceci de commun avec l'optique pré-scientifique, qu'elle se dispenserait d'une lumière telle que notre physique la définit aujourd'hui, jouant le rôle d'intermédiaire entre l'objet et l'œil⁽⁴³⁾... Peut-on envisager, dans cette perspective, des résonances de raisonnements de part et d'autre ? Il semble que ce soit le cas effectivement. Ainsi, de cette optique « sans lumière », nous souhaitons extraire deux aspects de raisonnements communs à l'histoire et à la pratique individuelle de l'optique naïve. Le premier est de nature lexicale, le deuxième porte sur une tendance forte du raisonnement pré-scientifique (qu'il soit individuel ou historique) à la matérialisation, celle du regard en particulier⁽⁴⁴⁾.

4.1. Une multiplicité de dénominations pour une idée identique

Lorsqu'elle cherche à expliquer la vision, la pensée naïve est guidée, selon nous,

(41) SIMON, *Ibid.*, p. 194.

(42) SIMON, *Ibid.*, p.167.

(43) Sauf, nous l'avons vu, dans les théories aristotéliennes.

(44) C'est ce que BACHELARD qualifie « d'obstacle substantialiste ».

Voir BACHELARD, *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin, 1938.

par un raisonnement ne faisant pas appel à la lumière sauf dans le but de rendre les objets visibles. Une telle conception induit des explications dans lesquelles l'œil envoie « quelque chose » vers l'objet, étant entendu que ce « quelque chose » n'est pas de la lumière. Parce que sa nature n'est guère explicitée, ce « quelque chose » fait l'objet de dénominations diverses. Ainsi, les enfants emploient-ils dans une apparente indifférence toute sorte de termes afin de qualifier ce qui sort de l'œil (le regard, la vue, le champ visuel, un truc...). Nous retrouvons un flou terminologique identique dans les raisonnements des protagonistes de l'optique de l'Antiquité. C'est sans doute ce qui pousse RONCHI à utiliser le terme « quid » afin de désigner ce qui sort de l'œil tant dans les théories pythagoriciennes que platoniciennes. Le « quid » se substitue tantôt au « feu » de Platon, tantôt au « rayon visuel » d'Euclide... mais conforte l'œil dans son rôle actif. En fait, peu importe la nature respective du « quelque chose » ou du « quid », l'essentiel est de constater qu'il existe, de part et d'autre, une foison de labels et que ces labels sont tous équivalents sur un point : ils ne désignent pas la lumière au sens où la physique la définit aujourd'hui, mais ils désignent l'activité visuelle de l'œil.

4.2. Une tendance commune à la matérialisation

L'effort d'abstraction qui sous-tend les modèles du physicien est complexe, et force est de constater que la pensée naturelle lui oppose une gaillarde résistance. Ainsi, pour les élèves, la « lumière » est une entité visible, l'image optique se déplace en bloc... Autant d'associations que réalise la pensée naturelle et qui sont la signature de la tendance de cette même pensée à la matérialisation. La tendance exprimée demeure celle qui rassure et qui conforte l'élève dans le monde du sensible, celui qui se voit, qui se touche, celui qui possède des dimensions, le monde du commensurable. Alors que nous, enseignants, rêvons d'un idéal de raisonnement dans lequel faire de l'optique procéderait de mécanismes selon lesquels l'immatériel succéderait au matériel, le ponctuel au global, l'invisible au visible... D'ailleurs, notre détour historique nous enseigne qu'une telle tendance à la matérialisation était présente dans l'optique de l'Antiquité. On peut penser qu'elle est à l'origine des « écorces » de LUCRÈCE, qu'elle sous-tend une certaine matérialité du regard chez les pythagoriciens et chez PLATON. Ainsi, SIMON nous précise que les écorces sont toujours envisagées dans leur globalité et ne peuvent être décomposées en éléments isolés et que le regard va au contact des choses et se moule sur leur relief. Sur ce dernier point, SIMON propose un résumé explicite des idées des anciens :

« La vue nous livre directement ce qui est. Elle va au contact des choses, s'imprégner de leur couleur, s'appuyer sur leur position, se mouler sur leur relief, sentir glisser leur mouvement »⁽⁴⁵⁾.

Lorsque les élèves (ou les enfants) expliquent la vision par le regard qui « prend la forme » de l'objet à regarder, il nous semble que nous nous trouvons face à un raisonnement analogue à celui évoqué par SIMON. À titre d'exemple, Stanislas (5 ans et demi)

(45) SIMON, *Ibid.*, p. 192.

nous donne l'explication suivante :

« La lumière elle rentre dans les yeux et ça permet aux yeux d'envoyer un truc, de l'électricité peut-être, vers les choses et après, ça prend la forme, la couleur et comme ça on sait ce que c'est » (cf. figure 5).

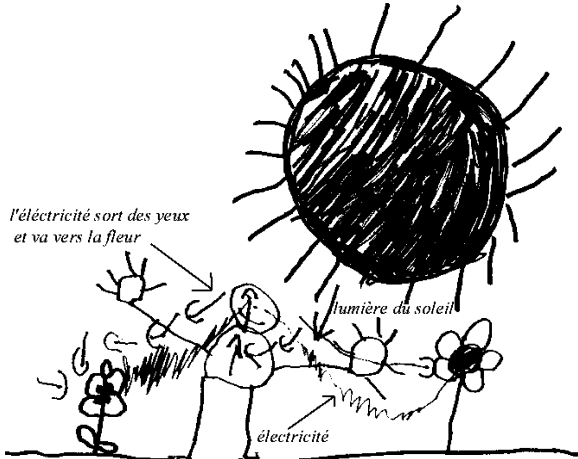


Figure 5 : Dessin illustrant la réponse de Stanislas. Parce que Stanislas ne sait pas encore écrire, nous avons pris la liberté de légendier son dessin en respectant fidèlement ses propres commentaires. Il est intéressant de remarquer que là encore l'enfant explique la vision par l'émission de quelque chose. Nous pensons que ce quelque chose n'est pas de la lumière : sur son dessin, la lumière est envoyée par le Soleil et non par les yeux. Le vocabulaire est d'ailleurs bien distinct.

Il nous semble légitime de croire que le « quid » historique a ceci de semblable avec le « truc » de Stanislas, qu'il est une substance dont la nature nous échappe (soit parce qu'elle relève d'une métaphysique intransposable, soit parce qu'elle n'est pas assez précise) doté de propriétés quasi-matérielles qui ne sont pas celles de la lumière du physicien d'aujourd'hui. Si l'on restreint notre étude historique de la vision à la seule théorie de l'émission d'un « quid » depuis l'œil vers l'objet, on constate qu'elle trouve son alter ego dans certains raisonnements d'élèves à propos de la vision. Dans ce cas, lorsque l'activité de l'œil est invoquée, ce n'est jamais pour en faire sortir de la lumière, comme le ferait les phares d'une voiture ou un flambeau. Et, ce qui est remarquable, c'est que l'on trouve des éléments d'analogies dans les manifestations de raisonnement mis en œuvre par les deux parties (historiques et individuelles). D'une part, le « quid » fait l'objet de dénominations diverses, d'autre part, ce même « quid » possède des propriétés matérielles. Nous aurions pu étendre notre étude à la théorie des « écorces » : la notion « d'image voyageuse » en est le pendant individuel.

CONCLUSION

Si l'on regarde de près les raisonnements des élèves en optique à propos de la

vision, de la lumière et de la formation des images, on peut être frappé des similitudes qu'ils donnent à voir avec les théories optiques de la Grèce antique. Le problème est de savoir de quelles similitudes il est question. En d'autres termes, à quelle condition peut-on affirmer que les raisonnements des élèves à propos de la vision présentent des caractéristiques communes avec les théories de l'Antiquité ? D'après l'analyse présentée ici, le concept construit de lumière, tel que la physique le définit aujourd'hui, n'est pas opérationnel dans les théories antiques de la vision, pas plus qu'il ne l'est dans les raisonnements spontanés des élèves.

Cette caractéristique commune induit des mécanismes de pensée proches. Si l'on considère les méandres laborieux que le concept de lumière rencontra au cours de son élaboration et dont l'histoire des sciences est témoin, on peut s'attendre à ce qu'il peine à devenir opérationnel chez les élèves, même après un acharnement didactique de longue haleine. Cela n'a rien d'étonnant lorsque l'on admet qu'il a fallu près de quinze siècles pour qu'il le soit dans l'histoire. Ce détour par l'histoire nous renseigne sur les mécanismes de pensée qui risquent d'induire une résistance à l'enseignement et nous invite à rester vigilants face aux difficultés des concepts à enseigner⁽⁴⁶⁾.

Enfin, à ceux qui opposeraient à notre point de vue l'argument selon lequel les modes de pensée que nous avons choisis d'associer sont incomparables, nous souhaitons répondre ceci : il est indéniable que chaque mode de pensée se situe dans un cadre contextuel particulier, et il ne s'agit pas d'en nier l'existence. Ainsi, l'essence de l'optique de l'Antiquité n'est-elle en rien comparable avec celle de la pensée pré-scientifique. Et malgré tout, n'est-il pas extraordinaire que les débuts historiques de l'optique présentent des analogies avec l'optique de la pensée individuelle naïve ? Ces optiques se pratiquent autour d'un concept de lumière très particulier et qui n'a rien de commun avec ce qu'en dit la physique d'aujourd'hui. Ce sont des optiques « sciences de la vision » où le rôle de la lumière se limite à rendre opérant le regard. Si les yeux des platoniciens sont des $\varphi\omega\sigma\varphi\omega\alpha$ ⁽⁴⁷⁾ littéralement : des « porte-lumière », nul doute qu'au regard de certaines caractéristiques conceptuelles du terme « lumière » utilisé par PLATON ($\varphi\omega\sigma$ dont le sens poétique est aussi la vue⁽⁴⁸⁾), ceux des enfants le soient également. Cet obstacle est très largement sous-estimé dans l'enseignement et il ne suffit certainement pas de changer le sens des « flèches » pour aider les élèves à l'affronter.

BIBLIOGRAPHIE

- ◆ ARISTOTE. *De l'Ame*, livre II. Paris : Les Belles Lettres, 1989.
- ◆ BACHELARD G. (1938). *La Formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin, 1993.

(46) Voir SALTIEL et VIENNOT, *Ibid.*

(47) Voir p. 143.

(48) Voir le dictionnaire français-grec, Hâtier, 1956. À noter que le dictionnaire Bailly distingue pour ce même mot $\varphi\omega\sigma$, la « lumière du Soleil » de la « lumière des yeux ».

- ◆ FAWAZ A. et VIENNOT L. Image optique et vision. *Bull. Un. Phys.*, juillet-août-septembre 1986, vol. 80, n° 686, p. 1125-1146.
- ◆ FEHER E. et RICE K. Pinholes and images : children's conceptions of light and vision. *Science Education*, 1987, vol. 71, n° 4, p. 629-640.
- ◆ GALILI I. Student's conceptual change in geometrical optics. *International journal of science education*, 1996, vol. 18, n° 7, p. 847-868.
- ◆ GOLDBERG F., BENDALL S., GALILI I. Lenses, pinholes, screens and eye. *The Physics Teacher*, 1991, n° 9, p. 221-224.
- ◆ GOLDBERG F., McDERMOTT L. An investigation of students' understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror. *American journal of physics*, 1987, n° 55, p. 108-119.
- ◆ GUESNE E. Les conceptions des enfants sur la lumière. *New trends in physics teaching*, 1984, vol. 4, UNESCO.
- ◆ HIRN C. Comment les enseignants de sciences physiques lisent-ils les intentions didactiques des nouveaux programmes d'optique des classes de quatrième. *Didaskalia*, 1995, n° 6, p.39-54.
- ◆ HOSSON (de) C. La Formation d'image par une lentille convergente dans les programmes de 1992 de collège : éléments d'un bilan concernant les raisonnements des élèves. Mémoire de Tutorat (tuteur : KAMINSKI W.), LDSP, Université Denis Diderot Paris 7, 1998.
- ◆ KAMINSKI W. Conceptions des élèves (et des autres) sur la lumière. *Bull. Un. Phys.*, juillet-août-septembre 1989, vol. 83, n° 716, p. 973-996.
- ◆ KAMINSKI W. et MISTRIOTI Y. Optique au collège : le rôle de la lumière dans la formation d'image par une lentille convergente. *Bull. Un. Phys.*, avril 2000, vol. 94, n° 823, p.757-784.
- ◆ LUCRÈCE. *De Rerum Natura*. Paris : Les Belles Lettres, 1920.
- ◆ MAITTE B. *La Lumière*. Coll. Points Sciences, Paris : Seuil, 1981.
- ◆ NUSBAUMM. Classroom conceptual change : the lesson to be learned from the history of science. in Helm and Novak (eds), *Misconceptions in science and mathematics*, Department of education, Cornell University, p. 272-281.
- ◆ PLATON. *Timée*. Trad. A. RIVAUD. Paris : Les Belles Lettres, 1985.
- ◆ PIAGET J. et GARCIA R. *Psychogenèse et histoire des sciences*. Paris : Flammarion, 1983.
- ◆ RASHED R. L'optique géométrique. *Histoire des sciences arabes*, Paris : Seuil, 1997, p. 293-354.
- ◆ RONCHI V. *Histoire de la lumière*. Paris : Colin, 1956.
- ◆ ROSMORDUC J. Histoire des sciences et interdisciplinarité. *Histoire des sciences*, Paris : Hachette éducation, 1996, p. 16-22.

- ◆ SALTIEL E. et KAMINSKI W. Un exemple d'évaluation des nouveaux programmes : problèmes liés à l'évaluation elle-même et à la formation des maîtres. *Bull. Un. Phys.*, juillet-août-septembre 1996, vol. 90, n° 786, p. 1271-1287.
- ◆ SALTIEL E. et VIENNOT L. What do we learn from similarities between historical ideas and the spontaneous reasoning of students ?, Lijnse (Ed.), *the many faces of teaching and learning mechanics*, GIREP, Utrecht 1985.
- ◆ SIMON G. *Le regard, l'être et l'apparence*. Paris : Seuil, 1988.
- ◆ VIENNOT L. Recherche en didactique et nouveaux programmes : convergences. *Didaskalia*, 1994, n° 3, p.125-136.
- ◆ VIENNOT L. *Raisonnement en physique, la part du sens commun*. Paris-Bruxelles : De Boeck, 1996.