Histoire et enseignement de la réfraction : propositions

par Bernard CALMETTES
IUFM de Toulouse
LEMME - Université Paul Sabatier - 31000 Toulouse

RÉSUMÉ

L'histoire de l'évolution des idées et de la construction des concepts en sciences doit aujourd'hui être développée dans l'enseignement. L'article apporte une contribution relative à l'intégration d'activités expérimentales et documentaires à caractère historique, à propos de la notion de «réfraction» étudiée en classe de seconde.

1. INTRODUCTION

L'enseignement et l'histoire des sciences sont appelés à se côtoyer dans les programmes scolaires aujourd'hui. Dans le domaine de la physique, nombreuses sont les suggestions faites, à propos de l'histoire de la gravitation et de l'astronomie par exemple.

Jean-Louis MARTINAND [1] envisage pour une bonne intégration différentes possibilités. Nous retiendrons, dans le cadre de notre article, les deux suivantes :

– il peut s'agir pour les élèves de **«mesurer leurs progrès aux obstacles franchis dans le passé par la communauté scientifique»**,

– ou bien «de promouvoir l'appropriation de **la science comme une aventure humaine**, et pas seulement comme l'acquisition de connaissances théoriques et instrumentales».

Il convient, avec ses finalités variées, de trouver une réelle complémentarité et une convergence entre les approches, une articulation entre les démarches d'investigation, expérimentale et documentaire, et des démarches de présentation, constructive et déductive. Rappelons à ce propos deux des objectifs généraux pour l'enseignement de la physique et de la chimie au collège et au lycée :

– «6 : L'enseignement doit faire ressortir que la physique... peut être décrite par un nombre de lois physiques universelles qui constituent une représentation cohérente de

l'univers... Dans cet esprit, il doit **faire appel à la dimension historique** de l'évolution des idées, quelle que soit la classe».

– «7 : L'enseignement doit montrer que cette **représentation cohérente est enracinée dans l'expérience** : les activités expérimentales ont une place essentielle».

Nous n'avons pas choisi, à cause des contraintes de temps essentiellement, de travailler sur un texte historique long, intégral, mais de construire une partie d'une activité à partir d'un extrait reconstruit de l'ouvrage d'un épistémologue des sciences : Alan CHALMERS [2].

Le thème de la séquence est la loi de la réfraction.

2. PROPOSITION

2.1. Point de départ : expériences et mesures

Dans le cadre d'une séquence «classique» sur ce sujet (cf. les manuels scolaires), sont abordés généralement les objectifs de contenus suivants : lois de la réfraction, mesure de l'indice d'un milieu transparent, retour inverse de la lumière, réflexion totale.
L'intégration d'une étude documentaire doit amener des modifications dans les objectifs suscités. La limitation horaire de la séquence à 1 h 30 min et une réelle intégration des activités ne peuvent permettre une simple juxtaposition des activités expérimentales habituelles et des activités documentaires. C'est pourquoi il peut être nécessaire de limiter alors l'objet de la séquence à la seule étude des lois de la réfraction.

Sur le plan expérimental, les élèves effectuent les mesurages des couples d'angles d'incidence et de réfraction dans le cas du passage de la lumière de l'air vers un autre milieu. Ces angles sont notés i et r dans la suite de cet article.

Que faire des valeurs de ces angles ?

– Le traitement classique consiste à énoncer que la relation complexe existant entre ces grandeurs est de forme sin i / sin r = constante et les élèves vont essayer de vérifier cette loi.

– L'approche historique permet de mesurer à quel point, dans ce cas précis, la science est vraiment une aventure et que la concrétisation de la compréhension d'un phénomène par une loi relève parfois du franchissement d'obstacles importants.
C'est cette dimension qui est le propos de cet article.

2.2. Le document à caractère historique

Nombreux sont les chercheurs et les savants qui se sont trouvés confrontés à ce problème. L'objectif de chacun était, bien entendu, selon eux, «d'ordonner la nature» et donc de trouver les lois qui régissaient le phénomène de réfraction.
Dans le livre de A. CHALMERS [2], les travaux de Ptolémée, Grosseteste, Witelo, Kepler, Hariott, Snell et Descartes sont abordés. Le document ci-après, pour les élèves, est construit à partir des données fournies par l'auteur.

2.3. Exploitation du texte

Les résultats de Ptolémée

Les relevés expérimentaux de Ptolémée ont été réalisés avec le dispositif suivant : «un disque de cuivre portant sur sa circonférence des marques correspondant à un intervalle d'un degré était suspendu dans un plan vertical, son diamètre correspondant à la surface de l'eau tandis qu'une marque colorée était fixée au centre du disque, au niveau de l'interface air-eau. Une deuxième marque était alors placée sur la circonférence du disque, au-dessus de l'eau, de telle façon que la droite reliant ces deux marques corresponde à un rayon incident. Une troisième marque pouvait être déplacée sur la circonférence du disque, en-dessous de la surface de l'eau, jusqu'à ce que, vue d'en haut, elle semble s'aligner sur les deux autres. La droite qui relie cette troisième marque au centre du disque correspond alors au rayon réfracté». Ce dispositif permet de fournir des résultats avec une précision du demi-degré.

Notons, au passage, que Ptolémée instituait le repérage des angles d'incidence et de réfraction par rapport à la perpendiculaire à la surface de séparation des milieux.

Les résultats de Ptolémée appellent les commentaires suivants :

– Effectivement, rayons incident et réfracté sont dans un même plan perpendiculaire à la surface du milieu de réfraction mais les rayons perpendiculaires à la surface sont réfractés (changement de vitesse) ; la réfraction dépend de la densité des milieux considérés ; si i_1 et i_2 sont deux angles d'incidence et r_1 et r_2 deux angles de réfraction correspondants ; alors $i_1/i_2 > r_2/r_1$. Les élèves peuvent vérifier ces premières observations à partir de leurs propres mesures.

– Le tableau 1 présentant angle d'incidence i et angle de réfraction r est beaucoup plus critiquable... L'observation des grandeurs montre une certaine régularité, une organisation particulière dans les valeurs des angles de réfraction. On peut mettre celle-ci en évidence en ajoutant au tableau présenté, la différence entre deux valeurs de r successives : $\Delta r = (r_n - r_{n-1})$.

L'EXTRAORDINAIRE PRÉHISTOIRE DE LA RÉFRACTION

D'après A. CHALMERS

Ptolémée *(IIe siècle)*

«Au sujet de ses résultats, Ptolémée s'est livré à des commentaires d'ordre qualitatif. Il a observé :
1) que le rayon incident et le rayon réfracté sont situés dans un même plan perpendiculaire à la surface du milieu de réfraction ;
2) que les rayons perpendiculaires à la surface ne sont pas réfractés ;
3) que l'importance de la réfraction dépend de la densité des milieux [...]. Il a remarqué que si i1 et i2 sont deux angles d'incidence et r1 et r2 les angles de réfraction correspondants, si i1 > i2, on a alors i1/i2 > r2/r1 [...].
Outre ces remarques qualitatives, Ptolémée a présenté ses résultats chiffrés sans y apporter de commentaires [...]».

Résultats de Ptolémée	
i°	**r°**
10	8
20	15 1/2
30	22 1/2
40	29
50	35
60	40 1/2
70	45 1/2
80	50

Robert Grosseteste *(au Moyen Age)*

«fut un des pionniers [de la méthode expérimentale moderne] en affirmant que l'expérimentation était le meilleur moyen d'étudier la réflexion et la réfraction de la lumière [...]. La loi de la réfraction qu'il avait proposée, est que l'angle de réfraction est égal à la moitié de l'angle d'incidence».

Witelo *(vers 1270)*

«rédigea un traité d'optique [dans lequel il] parle de la réfraction [...] et présente les résultats suivants [...]».

Air-eau		
i°	**r°**	**i° – r°**
10	7° 45'	2° 5'
20	15° 30'	4° 30'
30	22° 30'	7° 30'
40	29°	11°
50	35°	15°
60	40° 30'	19° 30'
70	45° 30'	24° 30'
80	50°	30°

Kepler *(début XVIIe siècle)*

«remarquable théoricien s'est intéressé à l'étude de l'optique [...Kepler] était convaincu que la bonne équation devait prendre la forme d'une fonction trigonométrique. Kepler en a essayé plusieurs, en partant d'expériences, dont :

$$i - r = k \sec i \; ; \; 2i - r = k \sin i \; ;$$
$$\mathrm{tg}\, i = k\, \mathrm{tg}\, r \; ; \; \mathrm{tg}\, i = \sin (i - r) \; ;$$
$$1 - \mathrm{tg}\, i \cot g\, (i - r) = k\, \mathrm{tg}\, i$$

(et ici il commence à perdre courage)

$$1 - \mathrm{tg}\, i \cot g\, (i - r) = k \sin i \; ;$$
$$i - r = k1 + k2 \sec i$$

et finalement :

$$1 - \mathrm{tg}\, i \cot g\, (i - r) = k1 + k2 \sin i.$$

Aucune de ces formules ne s'est révélée satisfaisante et c'est à ce point que le malheureux Kepler s'est avoué vaincu».

N.B. : La notation sec correspond à la fonction sécante aujourd'hui tombée en désuétude.
sec i = $\sin^{-1} i$.

Harriott *(1616)* a découvert la loi par l'expérimentation mais ne l'a pas publiée ; ***Snell*** *(1626)* l'a également mentionnée dans ses manuscrits ; ***Descartes*** *(1619 ?)* arriva par une théorie «géométrique» à découvrir la loi et la publia en 1637.

Résultats de Ptolémée		Calculs
i°	**r°**	**$\Delta r = (r_n - r_{n-1})°$**
10	8	–
20	15 1/2	7 1/2
30	22 1/2	7
40	29	6 1/2
50	35	6
60	40 1/2	5 1/2
70	45 1/2	5
80	50	4 1/2

Tableau 1

Il apparaît alors que Δr suit une loi de progression arithmétique, de raison (– 1/2) ! De fait, comme le relève A. CHALMERS, «**Ptolémée avait ajusté ces résultats afin qu'ils aient une certaine régularité**. [Il] a subrepticement modifié les conclusions de ses expériences pour qu'elles soient conformes à une idée préconçue». C'est une «loi» supposée qui a influencé les résultats expérimentaux.

Le cas de Grosseteste...

On ne peut accorder plus de crédits aux résultats expérimentaux et à la «loi de la réfraction» suivant Grosseteste, bien que celui-ci soit souvent cité comme étant effectivement à l'origine de l'idée suivant laquelle «tout part de l'expérience». Les élèves vérifieront sans problème que l'angle de réfraction n'est pas égal à la moitié de l'angle d'incidence. Comme dans le cas de Ptolémée, il y a d'abord le supposé de la loi. Les résultats expérimentaux arrangés viennent ensuite pour corroborer cette fausse loi.

Et celui de Witelo...

Witelo reprend les expériences avec des instruments plus précis. Cependant, ses résultats ne diffèrent pas de façon importante de ceux de Ptolémée dont il s'est, semble-t-il, largement inspiré. Seule la valeur de r pour i = 10° est en fait retouchée, la valeur de 7° 45' le rapprochant de celle que l'on pourrait effectivement attendre de son dispositif (7° 30'). Les autres couples (i, r) sont identiques à ceux de Ptolémée. Witelo ajoute dans ces tableaux de résultats la valeur (i – r) qui permet d'exprimer, selon lui, la «loi» de la réfraction. Hormis la valeur 2° 5', pour laquelle on peut d'ailleurs remarquer une erreur (il aurait fallu noter 2° 15'), les écarts entre deux valeurs (i – r) successives suivent une progression arithmétique de raison 30' : 3°, 3° 30', 4°, etc.

Remarque (à présenter éventuellement lors de l'étude du chemin inverse de la lumière) : Witelo a également pu mettre en évidence le phénomène de réfraction dans le cas du passage de la lumière de l'eau vers l'air. Les résultats «expérimentaux» qu'il présente sont en fait basés sur une constance des grandeurs, (i – r) devenant égal à (r – i) ! Cette approche conduit Witelo à des valeurs qui sont étonnantes et il conclut : «La quantité de réfraction est la même dans chacun des deux modes de passage, mais ces deux modes diffèrent par leur type car, en passant d'un milieu plus raréfié à un milieu plus dense, le rayon se rapproche de la perpendiculaire, alors qu'en passant d'un milieu plus dense à un milieu plus raréfié, il s'écarte de la perpendiculaire», même jusqu'à 110° !

Air-eau			**Eau-air**	
i°	**r°**	**i° – r°**	**r°**	**r° – i°**
10	7° 45'	2° 5'	12° 5'	2° 5'
20	15° 30'	4° 30'	24° 30'	4° 30'
30	22° 30'	7° 30'	37° 30'	7° 30'
40	29°	11°	51°	11°
50	35°	15°	65°	15°
60	40° 30'	19° 30'	79° 30'	19° 30'
70	45° 30'	24° 30'	94° 30'	24° 30'
80	50°	30°	110°	30°

Tableau 2

Il semble que cette pratique de manipulations des données «expérimentales» afin qu'elles se conforment à des lois soit relativement courante dans l'histoire, au moins dans le cas de la réfraction. A. CHALMERS cite les noms d'autres savants ayant procédé ainsi ou ayant utilisé les résultats de Ptolémée tout en sachant qu'ils n'étaient pas conformes à la réalité observée et mesurée : Alhasen (965-1039), Al-Farisi (XIIIe siècle). Les «lois» de référence étaient parfois beaucoup plus difficiles à mettre en évidence que celle de Ptolémée !

De fait, les compétences admises et contrôlées dans les processus expérimentaux n'ont été que progressivement introduites ; cela surtout grâce à des pionniers comme Kepler et Galilée, au cours du XVIIe siècle. Afin de qualifier les résultats scientifiques, la communauté des chercheurs s'accorde aujourd'hui sur la nécessaire recherche et l'élimination des sources possibles d'erreurs, l'estimation des incertitudes, la répétitivité des mesures, le cadrage des conditions opératoires, le rôle de différentes variables, la critique sociale des résultats.

Kepler

Nous avons refait systématiquement la plupart des calculs de Kepler et ceci peut être conduit par les élèves grâce à l'utilisation des tableurs informatiques ou par calculatrice [3]. Dans le tableau 3, les grandeurs d'une ligne (sauf, bien sûr, les quatre premières) auraient du être identiques pour que les «lois» pressenties par Kepler soient exactes. Quand cela était nécessaire et ne possédant pas de plus amples informations sur les données sur lesquelles travaillait Kepler, nous avons exposé les résultats pour des angles exprimés en radians ou en degrés. Les valeurs de i et de r sont celles obtenues pour un passage air-eau avec un indice de 1,33 (valeurs calculées).

i *(en degré)*	10	20	30	40	50	60	70	80
i *(en radian)*	0,174	0,348	0,522	0,696	0,87	1,044	1,218	1,392
r *(en degré)*	7,5	14,9	22,1	28,9	35,2	40,6	44,9	47,8
r *(en radian)*	0,1305	0,2593	0,3843	0,503	0,6122	0,7075	0,7832	0,8329
(i – r) / sec i *(en radian)*	0,0428	0,0834	0,1194	0,1481	0,1662	0,1692	0,1502	0,0994
(i – r) / sec i *(en degré)*	2,4623	4,7943	6,8652	8,5183	9,5628	9,7436	8,6554	5,732
2i – r / sin i *(en radian)*	1,2561	1,2806	1,3231	1,3865	1,4755	1,597	1,7612	1,9827
2i – r / sin i *(en degré)*	72,203	73,603	76,051	79,7	84,82	91,83	101,29	114,05
tan i / tan r	1,3389	1,3675	1,4224	1,5184	1,688	2,0104	2,7277	5,0309
tan i / sin (i – r)	4,0457	4,0952	4,1902	4,3562	4,6495	5,2073	6,448	10,432
(1 – tan(i) * cotan (i - r)) / tan i	– 17,31	– 8,488	– 5,477	– 3,92	– 2,949	– 2,277	– 1,785	– 1,418
(1 – tan i * cotan (i - r)) / sin i	– 17,57	– 9,029	– 6,319	– 5,109	– 4,574	– 4,529	– 5,166	– 7,971

Tableau 3

Les malheurs de Kepler quant à la découverte de la «loi» de la réfraction mettent en évidence malgré tout que :

– La connaissance de départ est bien ici la donnée expérimentale. Il ne peut s'agir, comme l'ont fait les autres chercheurs suscités, de modifier cette donnée pour qu'elle se conforme à la loi.

– Contrairement à ce que pressentaient ces mêmes autres chercheurs, la loi de la réfraction n'est pas une loi mathématiquement simple.

– Il ne s'agit pas pour Kepler de trouver une explication à la réfraction, explication qui pourrait justifier la relation expérimentale, mais de formuler une relation entre les grandeurs mesurées.

Il paraît légitime que le problème auquel se trouvent confrontés les élèves face au tableau de mesure (i, r) est un problème important, un problème qui jusqu'au XVIIe siècle n'a pas trouvé de solution.

Harriott, Snell et Descartes

Mais, Harriott, Snell et Descartes ont-ils donné un résultat convenable ?

Si l'on s'en tient à l'aspect empirique (du type de celui de Kepler : on essaie des relations jusqu'à ce que ça marche), il apparaît effectivement qu'Harriott et Snell avaient trouvé la relation. Il revient à Descartes, semble-t-il, même si tous les historiens des Sciences ne s'accordent pas sur ce sujet, d'avoir fourni, en même temps que des résultats expérimentaux, une justification à caractère théorique.

Descartes avait la volonté de mathématiser la physique et il avait la conviction que les explications des phénomènes du monde devaient n'être que mécaniques et mathématiques. Des précisions sont données dans un récent cédérom [4]. On y lit : «Pour Descartes, le vide n'existe pas, la transmission de tout mouvement se fait par contact, par pression, par choc. Il assimile ainsi le rayon lumineux à une balle lancée au travers d'une toile tendue ou une surface d'eau. Ses explications se ramènent alors à deux hypothèses très simples :

– La vitesse de la balle est différente dans les deux milieux.

– La composante de la vitesse parallèle à la surface de séparation est conservée.

De ces deux hypothèses, on déduit en langage moderne l'expression de la loi de la réfraction».
On pourra lire les détails de cette démonstration dans une réédition des ouvrages de Descartes [6] et dans un article de J.-P. MATHIEU [7]. Ce dernier précise le point de vue de Descartes à propos de sa comparaison entre un corps matériel et la lumière ; il écrit : «[Souvenez-vous] de la nature que j'ai attribuée à la lumière quand j'ai dit qu'elle n'était pas autre chose qu'un certain mouvement ou une action reçue en une matière très subtile, qui remplit les pores des autres corps».

Mais pour A. CHALMERS «les déductions de Descartes ne sont guère convaincantes car elles sont fondées sur des hypothèses fausses et donc ses arguments ne sont pas très concluants». P. GUAYDIER [5] précise également, dans le même sens, que «**Descartes** élabora une théorie assez discutable [...]. Il considérait **la lumière** comme **se propageant dans les milieux denses plus vite que dans l'air**». Cette proposition, contraire aux faits, on le sait aujourd'hui, a tout de même permis à Descartes de donner une explication pour le phénomène de l'arc-en-ciel et de contribuer à la théorie des lentilles et par conséquence des instruments optiques et de l'œil.

Fermat, Newton et Foucault

Fermat, contemporain de Descartes, utilisant un principe, à l'origine purement mathématique, basé sur l'étude des extremums des fonctions algébriques et appliqué à la réfraction, émit l'hypothèse que la lumière prend toujours, pour aller d'un point à un autre, un chemin extremum. Contre Descartes, Fermat aboutit à l'idée selon laquelle la lumière allait plus vite dans l'air que dans l'eau ! Les débats entre les deux savants furent polémiques.

Newton (en 1686), avec des concepts différents, l'espace vide et sa théorie corpusculaire de la lumière, retrouve également la loi de la réfraction : «La vitesse du corps avant l'incidence est à la vitesse après émergence comme le sinus de l'angle d'émergence est au sinus de l'angle d'incidence» (cf. [7]). Mais pour lui la vitesse des corpuscules de lumière est plus grande dans les milieux plus denses que dans l'air.

C'est au cours du XIXe siècle que, suite aux mesures de la vitesse de la lumière dans l'eau réalisées par Fizeau et Foucault (1850), on sut que les hypothèses de Fermat étaient correctes.

3. CONCLUSION

Qu'il faille finalement donner aux élèves à vérifier la proportionnalité entre les sinus ne doit cependant plus être considéré comme un artifice quand le détour historique a mis en évidence les nombreuses difficultés, les aléas, les débats, les tâtonnements, les rôles des hypothèses, des résultats expérimentaux et des connaissances mathématiques nécessaires pour la construction de la science.

BIBLIOGRAPHIE

[1] J.-L. MARTINAND : *«Histoire et didactique de la physique et de la chimie : quelles relations ?»*, Didaskalia n° 2, Paris, 1993.

[2] A. CHALMERS : *«La fabrication de la science»*, Paris, Éditions La Découverte, 1991.

[3] La cahier n° 2 du BUP n° 789 (décembre 1996) propose quelques possibilités de travail sur ce type de problème. A propos de la loi de la réfraction, le lecteur pourra particulièrement trouver des explications dans les articles de P. JACQUINOT (pp. 45-50) et de J. WINTHER (pp. 83-94), Paris, BUP, 1996.

[4] Descartes, construire la connaissance, Cédérom, Cosei et Espace Mendès France, 1996.

[5] P. GUAYDIER : *«Histoire de la physique»*, Paris, PUF, Que sais-je ? n° 421, 1964.

[6] R. DESCARTES : *«La dioptrique»* in Discours de la méthode dans l'édition datée de 1991, Paris, Gallimard, Folio, Essais, n° 158, pp. 149-309, 1637 pour la première édition, 1991 pour l'édition Folio.

[7] J.-P. MATHIEU : *«Sur l'histoire de la réfraction des rayons de lumière»*, Paris, BUP n° 692, mars 1987.