

Transposition didactique en physique : exemple de la lumière

Brahim El Fadil

Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canada

Pour citer cet article :

El Fadil, B. (2021). Transposition didactique en physique : exemple de la lumière. *Didactique*, 2(2), 10-40. <https://doi.org/10.37571/2021.0202>.

Résumé : Cet article examine la transposition didactique des concepts associés à la lumière dans les disciplines science et technologie et physique, en analysant les manuels scolaires utilisés au Québec. Les résultats de l'étude montrent que les manuels analysés accordent très peu de place aux trois concepts essentiels à la compréhension de la nature de la science en général et à celle de la lumière en particulier: les modèles théoriques, l'histoire des sciences et la place du doute. Cela conduit à une dogmatisation du savoir transposé au niveau du savoir à enseigner. Trois explications à cette situation nous paraissent plausibles: la première tient au statut de la science dans la société. La deuxième tient à l'absence de liens entre les lieux de production des savoirs et le ministère de l'Éducation. La troisième, d'ordre épistémologique, tient au statut de la physique chez laquelle les concepts abstraits, les lois et les théories occupent une position particulière par rapport aux autres disciplines. En d'autres mots, l'histoire de l'optique a subi plusieurs changements de paradigmes et ses modèles théoriques ne sont pas encore stabilisés.

Mots-clés : lumière, photon, optique, onde, corpuscule, dualité

Problématique

Cet article s'intéresse à la transposition didactique (TD) dans le cadre de l'enseignement de la physique, plus spécifiquement à celle des concepts associés à la lumière. Cette dernière est pertinente pour notre étude pour plusieurs raisons. D'abord, ses concepts sont prescrits dans le *Programme de la formation de l'école québécoise* (PFEQ) (Gouvernement du Québec, 2006). En outre, pour didactique, la lumière est un concept difficile à cerner (Uzun, Alev, et Karal, 2013). Pour la recherche scientifique, la lumière est essentiellement l'histoire de tout ce que nous savons de notre univers (Al-Khalili, 2014). Finalement, si on examine les repères culturels possibles tels que suggérés par le PFEQ en considérant les prix Nobel décernés en physique entre 2000 et 2020, nous voyons, sur le site web <https://www.nobelprize.org/>, que dix prix ont une relation directe avec la lumière (2020 : trous noirs; 2019 : place de l'univers dans le cosmos; 2018 : lasers; 2014 : lumière bleue; 2011 : expansion de l'univers; 2009 : transmission de la lumière; 2006 : corps noir dans le cosmos; 2005 : cohérence optique; 2002 : astrophysique; 2000 : optoélectronique).

Alors, quelle est la nature de cette entité qui nous informe autant et motive la recherche scientifique et comment est-elle enseignée?

Au Québec, le récent PFEQ (2006) introduit au secondaire une nouvelle discipline appelée « science et technologie » (ST) obligatoire pour tous les élèves de la 1^{re} à la 4^e année du secondaire. Les élèves qui souhaitent enrichir leur formation en sciences doivent poursuivre un ou deux cours en option, physique et/ou chimie en 5^e année. Le programme de physique se distingue par son contenu monodisciplinaire dont les concepts prescrits sont regroupés autour des concepts mécaniques et ceux de l'optique géométrique (*ibid*).

En ce qui concerne la recherche en éducation, si l'on considère les résultats des études qui ont traité la lumière au niveau secondaire, trois difficultés majeures pour les élèves peuvent se dégager des analyses : 1) confusion entre la lumière et sa source, 2) difficulté à comprendre le phénomène de la réflexion de la lumière sur différentes surfaces et 3) difficulté à comprendre la nature de la lumière.

Pour la première, plusieurs chercheurs soulignent que la plupart des élèves du secondaire n'arrivent pas à distinguer la lumière de sa source (Blizak, Chafiqi et Kendil, 2009 et Castro, 2013). Dans ce sens, Fetherstonhaugh, Happs et Treagust (1987) montrent que la majorité des jeunes du secondaire considèrent que la lumière est toujours associée à sa source ou à l'effet produit. Selon eux, les élèves ne voient pas comment la lumière peut exister entre l'ampoule (la source) et « sur l'objet observé ». Cette difficulté provient de la

tendance des sujets à associer la lumière exclusivement à sa source ou aux effets visibles qu'elle provoque.

Quant à la deuxième difficulté, les résultats de Anderson et Smith (1984) et de Thiberghien *et al.* (1980) montrent que la majorité des élèves du secondaire mentionnent que le miroir reflète la lumière, alors que lorsqu'on éclaire un morceau de papier ou un autre objet, les apprenants pensent que la lumière quitte la source et reste collée sur le papier ou sur l'objet éclairé.

En ce qui concerne la troisième difficulté, Driver *et al.* (1985) soulignent que les élèves du secondaire sont capables de représenter la lumière à l'aide de rayons rectilignes, même s'ils ne savent pas ce que cela représente, car la plupart des enseignants utilisent généralement des lignes droites pour représenter la lumière. Par ailleurs, Anderson et Karrqvist (1983) découvrent que l'idée de la lumière comme étant une entité physique qui se propage dans l'espace et le temps n'avait été comprise que par 30% des élèves. Ce résultat a amené ces chercheurs à remettre en question l'efficacité de l'enseignement de l'optique géométrique au secondaire.

D'une manière générale, les difficultés mentionnées ci-dessus, ainsi que les orientations curriculaires, qui prescrivent l'optique en 3^e et 5^e années, ajoutent de nouveaux défis non seulement pour les enseignants, mais aussi pour les concepteurs des manuels, car ces derniers jouent un rôle clé dans l'enseignement de la science (Hasni et Roy, 2006; Valverde *et al.*, 2002). Par conséquent, il nous semble pertinent d'étudier comment les manuels de ST et de physique utilisés au Québec transposent les concepts fondamentaux tels que celui de la lumière.

Dans un document encadrant la production et l'utilisation des manuels au Québec, la Commission du matériel didactique (2002) attribue huit fonctions aux manuels scolaires : 1) médiation entre le programme et les enseignants ; 2) soutien à l'enseignement ; 3) support à l'apprentissage ; 4) référent pour l'élève et ses aidants; 5) rehaussement culturel; 6) promotion de valeurs sociétales; 7) garantie de la gratuité scolaire et 8) supervision pédagogique (Hasni *et al.*, 2009).

En raison du rôle important que jouent les manuels dans l'enseignement, de nombreuses études les ont analysés sous différents angles. À titre d'exemple, les manuels ont été analysés en fonction de l'égalité des sexes (Elgar, 2004), du niveau des questions (Pizzini *et al.* 1992), de la qualité du vocabulaire (Groves, 1995), de l'exactitude du contenu

(Hubisz, 2003), de concept d'erreur (King, 2010) et du point de vue didactique (Develay, 1987; Hasni et Roy, 2006; Li *et al.*, 2020).

En considérant toutes ces recherches, notre étude s'inscrit dans la continuité de celles qui avaient comme angle d'approche le point de vue didactique, spécifiquement celles qui ont abordé le contenu pour analyser la TD (Develay, 1987). D'ailleurs, lorsqu'on considère les études qui ont porté sur l'analyse des manuels, deux orientations principales peuvent se dégager de l'examen des écrits scientifiques. La première constate que les manuels accordent une attention particulière à la terminologie et à la mémorisation des faits (Hasni et Roy, 2006; Lumpe et Beck, 1996). La deuxième orientation relève le déficit sur le plan théorique et conceptuel, le peu de place accordée au doute dans la production des savoirs, ainsi que l'insuffisance de la présence de l'histoire des sciences (Abd-El-Khalick *et al.* 2008; Develay, 1987; Li *et al.*, 2020).

Cadre théorique

Le cadre d'analyse retenu pour cette étude est centré sur deux concepts : la TD et les différentes théories sur la lumière.

Transposition didactique

Lorsque Chevallard (1985) introduit le concept de la TD, il avait des préoccupations à l'égard de la sélection des savoirs à enseigner à l'école (leur origine et leur choix). Opérationnellement, la TD peut être vue comme l'activité par laquelle un savoir « savant » est transformé de manière à pouvoir être enseigné à des apprenants plus ou moins novices en la matière. Par ailleurs, plusieurs chercheurs soulignent que les savoirs savants ne constituent qu'une ressource, parmi d'autres, pour l'élaboration des programmes scolaires. Il y a des disciplines et des enseignements dans lesquels le savoir de référence n'est pas le savoir savant (éducation technologique, arts, éducation physique) (Clerc, Minder et Roduit, 2006). C'est dans cette logique que Martinand (1986) a introduit le concept de pratiques sociales de référence (PSR). Ces dernières désignent l'ensemble des activités sociales (vécues, connues ou imaginées) qui vont servir de référence pour construire des savoirs à enseigner et des savoirs enseignés. Les PSR fournissent également un outil pour questionner les activités scolaires en les comparant avec les réalités qu'elles voulaient faire découvrir. Le concept de PSR permet alors à l'élève de donner du sens à ce qu'il apprend, et à l'enseignant de donner du sens à ce qu'il enseigne (*Ibid.*).

D'une manière générale, on peut schématiser le processus de TD ainsi (figure 1):

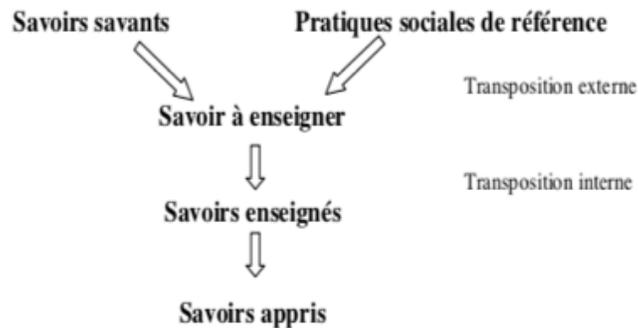


Figure 1. Schéma de la TD (source : Clerc, Minder et Roduit, 2006)

Didactiquement, pour que l'enseignement d'un concept de la physique soit légitimé, il a à refléter ce qui est admis comme constituant de la physique aujourd'hui. Il faut qu'il y ait une « ressemblance » minimale entre savoir enseigné et savoir savant ou PSR. Le terme ressemblance signifie que le savoir enseigné doit être remodelé en fonction d'exigences didactiques, mais qu'il doit continuer à « ressembler » au savoir savant sous peine d'être accusé d'obsolescence (Philippe, 2004).

Pour illustrer le processus de la TD, la figure 1 présente une modélisation en quatre niveaux: un niveau externe et trois niveaux internes. Le niveau externe renvoie à la société en matière de savoirs savants et de PSR. Le premier niveau interne renvoie au législateur qui sélectionne les savoirs et les PSR qui lui semblent les plus pertinents à enseigner et les traduit en programme de formation, puis en manuel scolaire. Ce dernier est donc un résultat d'un processus d'une TD des textes du programme (Chevallard, 1985). Mais, comme le souligne Develay (1992), dans chaque passage d'un niveau de la TD à un autre, il y a une forme de perte de savoirs. Par conséquent, le manuel scolaire, qui est une réalisation effective des enseignements donnés en classe, ne constitue qu'une traduction partielle du programme selon une interprétation des auteurs (Chaachoua, 2009). Au deuxième niveau de la TD, l'enseignant s'appuie sur le manuel, sélectionne un savoir et planifie sa situation d'enseignement, qui ne transmet qu'une partie du programme qui lui semble prioritaire par rapport non seulement aux caractéristiques des élèves, mais aussi à ses connaissances. Ainsi, l'enseignant traduit le programme sous une forme de recette prête à être appliquée en classe et décide quoi, comment et pourquoi apprendre (McComas, 1998). Au dernier

niveau de la TD, on parle des savoirs assimilés. En fin de compte, l'élève n'assimile qu'une partie de ce que l'enseignant souhaite lui enseigner.

Quant à la transformation des savoirs d'un niveau à l'autre, plusieurs auteurs soulignent que les savoirs scolaires ne sont pas organisés de la même manière que les savoirs savants (Thouin, 2009). Par conséquent, les problèmes abordés en ST avec les élèves et les relations établies entre les différents concepts enseignés diffèrent des problèmes et des relations qui préoccupent les scientifiques. Lorsqu'elle est non adéquate, la transformation entre les deux types de savoirs peut prendre, entre autres, plusieurs des formes synthétisées dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1. Risques d'une TD mal réussie (Thouin, 2009)

Forme	Description
Dogmatisation	Présenter un savoir comme fait ou vérité. Pas de place laissée au doute.
Décontextualisation	Absence de l'origine, du contexte de production, de l'utilité, des applications pratiques, des lois et théories scientifiques dans les activités scolaires.
Dépersonnalisation	Abstraction de l'histoire des sciences, des idées dominantes de l'époque, de la vie et des motivations des scientifiques à qui l'on doit le développement des concepts enseignés.
Désyncrétisation	Manque de cohérence et de logique dans l'organisation des savoirs et concepts enseignés.
Opérationnalisation excessive	Dans les pratiques, les savoirs scolaires se traduisent souvent par des activités facilement vérifiables au moment de l'évaluation des apprentissages. Cette opérationnalisation peut limiter les savoirs scolaires à des aspects secondaires des savoirs savants.

Théories de la lumière

Nous avons choisi de présenter les concepts de la lumière dans une approche historique pour des raisons méthodologique et didactique suivante. Méthodologiquement, afin d'aborder la TD, nous devons commencer par le niveau externe (savoirs savants et PSR) pour pouvoir analyser les transformations didactiques entre les différents types de savoirs. Didactiquement, en procédant ainsi, l'enseignant peut profiter de l'existence de deux modèles théoriques parallèles qui s'opposent sur plusieurs situations afin d'illustrer la nature, le rôle et les limites des modèles scientifiques (Gilbert et Boulter, 2000). Également, cette approche place les savoirs scientifiques dans leur contexte d'élaboration humain et social; montre que le concept scientifique ne se développe pas d'une manière linéaire, le processus de son développement passe par des hauts et des bas, des ruptures et des

changements de paradigmes, et qu'il évolue dans le temps selon les échanges entre les scientifiques; fait connaître le rôle que joue la démarche scientifique dans la construction des savoirs; et, révèle que le savoir savant n'est ni certain ni absolu. Il est toujours sujet de débats et de divergences chez les scientifiques.

Rayon lumineux

Certes, la lumière fait partie de l'environnement humain depuis le début de l'histoire. C'est probablement pour cette raison qu'on retrouve les premières notions la concernant chez plusieurs cultures anciennes. Mais ces notions étaient de nature religieuse et accordaient à la lumière un ordre divin (Vohnsen, 2004).

Les philosophes grecs ont été les premiers à chercher à expliquer la nature de la lumière en dehors du cadre religieux. Pour eux, la lumière était intimement liée à la vision : les pythagoriciens pensaient que quelque chose sortait de l'œil et s'en allait vers l'objet ; les adeptes de Démocrite croyaient que quelque chose matérielle partait de l'objet et atteignait l'œil; contrairement aux partisans d'Empédocle qui pensaient que voir était une combinaison de quelque chose partant de l'œil vers l'objet et de l'objet vers l'œil (*Ibid.*). Par la suite, Euclide (300 av. J.-C.), qui est considéré comme fondateur de la géométrie, accorde un traitement géométrique à la lumière en énonçant un certain nombre de propriétés qui sont encore utilisées aujourd'hui : la propagation rectiligne des rayons lumineux et de la loi de réflexion.

Vers le début du 11^e siècle, Ibn Al-Haytham (965-1040), connu sous le nom de *Alhazen*, était, selon Zoubairy (2016), non seulement le premier à suivre une démarche d'investigation pour aborder une question scientifique, mais il était aussi considéré comme fondateur de l'optique moderne. Par sa rigueur méthodologie, Inb Al-Haytham a été le premier à prouver que la théorie selon laquelle la lumière sortait de l'œil était fautive et il a montré qu'elle provenait des sources lumineuses. En fait, il a réalisé une expérience simple dans une chambre noire où la lumière était envoyée à travers une petite ouverture aménagée sur une cloison qui séparait la chambre d'observation et un ensemble de sources de lumière (lanternes). Ces dernières étaient maintenues à différentes hauteurs à l'extérieur de la chambre noire (Figure 2).

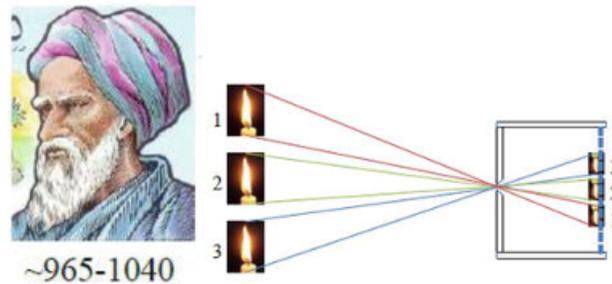


Figure 2. Expérience de Ibn Al-Haytham (source : Roychoudhuri, 2019)

En interceptant la lumière sur un écran d'observation au fond de la chambre, Ibn Al-Haytham observe des taches lumineuses correspondantes aux rayons lumineux provenant de chaque lanterne. Lorsqu'il couvre une lanterne, la tache lumineuse lui correspondant disparaît. Les observations de son expérience ont conduit aux résultats suivants: 1) la lumière n'émane pas de l'œil humain, mais elle est émise par une source; 2) la lumière se déplace en ligne droite, et 3) les rayons lumineux n'interagissent pas au niveau de l'ouverture (Roychoudhuri, 2019). C'est sur la base de ces expériences que le premier appareil photo a été inventé (Al-Salihi, 2008). Ibn Al-Haytham s'est intéressé aussi à la vision et à la structure de l'œil. Mais, dans ses travaux sur l'œil, il considérait le cristallin comme lieu de formation de l'image (Zoubairy, 2016).

Par la suite, Kepler (1604) réalise quelques expériences à l'aide de lentilles afin de corriger les anomalies des yeux. L'analyse de ses résultats a amené à comprendre que l'image ne se forme pas sur le cristallin, mais sur la rétine (Vohnsen, 2004).

Quelques années plus tard, Galilée (1609) combine des lentilles et invente son propre télescope qui lui a permis d'observer des planètes. Avec cet instrument primitif, Galilée a découvert non seulement quatre des lunes qui gravitent autour de Jupiter, mais aussi les phases de la Lune et de Vénus (Ibid).

En somme, jusqu'aux travaux de Galilée, bien que les études sur l'optique se soient multipliées, aucune d'elles n'a proposé de théorie sur la nature de la lumière. Ce qui est connu à cette époque, c'est que la lumière est une entité qui se déplace en lignes droites de chaque point d'un objet à l'œil de l'observateur.

Théorie particulière

L'idée que la lumière devait être constituée de particules matérielles a été soutenue par les travaux de Descartes (~1637) et de Snell (~1626) qui ont développé la loi de réfraction de la lumière (Vohnsen, 2004). Les deux scientifiques considéraient la réflexion d'un faisceau lumineux comme étant analogue à la collision élastique d'une balle de tennis sur une surface plane (*Ibid.*). Cette idée a atteint son apogée avec les travaux de Newton (~1704). La contribution de ce dernier sur le développement des connaissances scientifiques ne se limite pas seulement à la lumière. Sir Isaac Newton (1642–1727) est certainement l'une des figures les plus déterminantes de l'histoire de la physique. Dans son livre *Principia*, publié en 1686, il a développé les bases de la mécanique classique (principe d'inertie; principe fondamental de la dynamique; principe d'action-réaction). Il est aussi le père de la théorie de gravitation universelle (Zoubairy, 2016).

La loi de gravitation universelle stipule que toutes les particules de matière dans l'univers exercent l'une sur l'autre une force attractive directement proportionnelle à leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. L'une des applications de cette loi dans le cadre de la conservation de l'énergie mécanique amène Newton à introduire un autre concept pertinent: *vitesse de libération* (V_l). Cette dernière représente la vitesse nécessaire à un objet pour se libérer de l'attraction gravitationnelle d'un autre corps (planète) (Knight, 2013). Le calcul mathématique que nous n'aborderons pas ici donne $V_l = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$, où G est la constante gravitationnelle, R le rayon de la planète et M sa masse.

Comment donc Newton s'est-il intéressé à l'optique et quel est le lien entre les connaissances mécaniques développées ci-dessus et la lumière ?

À l'origine de la réflexion de Newton sur la lumière, on trouve une motivation technologique. En fait, il était fasciné par les découvertes de Galilée sur les planètes et il a cherché à améliorer les instruments d'observation (Gabriel, 2015). Pendant qu'il travaillait sur le polissage de lentilles, il se rendit compte d'une aberration chromatique (défaut sur les couleurs). Pour comprendre ce phénomène, il a réalisé d'autres observations sur la lumière du soleil à l'aide de prismes. Il a ainsi constaté que la lumière blanche du soleil, après avoir traversé un prisme, formait un arc-en-ciel qu'il a nommé « spectre » (Figure 3).

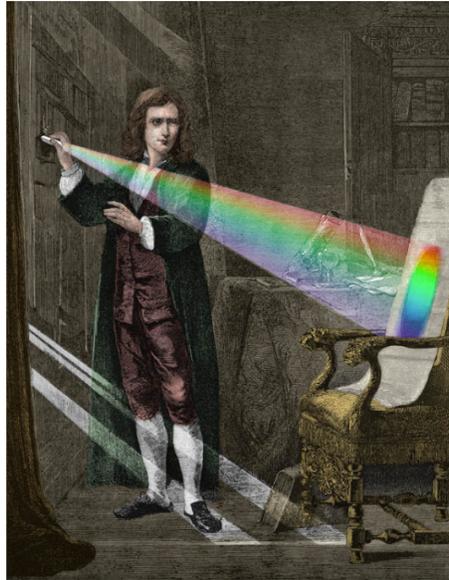


Figure 3. Décomposition de la lumière de Newton (Guérin, 2015; <http://diaprojection.fr/>)

À l'inverse, pour consolider sa théorie, Newton utilise un disque coloré de plusieurs couleurs; lorsqu'on fait tourner le disque à haute vitesse, les couleurs se fusionnent et forment la couleur blanche. Par ces observations, Newton découvre que les couleurs du spectre visible peuvent être extraites de la lumière blanche (Zoubairy, 2016). Pour interpréter ses observations, Newton postule que la lumière, d'origine matérielle, est constituée de minuscules particules, de masses différentes, émises par une source et qui se déplacent en ligne droite dans l'espace et les corps transparents à la même vitesse. Selon leur masse, chaque particule est déviée conformément au principe fondamental de la dynamique et à la théorie de gravité. Newton pense que c'est cette déviation qui est à l'origine du phénomène de la décomposition de la lumière (*ibid*).

Pour illustrer le transfert des savoirs entre différents domaines de la physique, citons les travaux de Michell (1782) et de Laplace (1796). Ces deux chercheurs analysent la formule de la V_l ($V_l = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$) et le postulat qui matérialise la lumière et imaginent qu'il pourrait exister une étoile qui aurait une si grande masse que la V_l serait égale à la vitesse de lumière. Par conséquent, même la lumière ne pourrait pas s'échapper de la gravité de cet astre. Ils ont appelé cet astre l'*étoile noire* pour Laplace et *Dark star* pour Michell. C'est ce concept qui évoluera plus tard pour devenir le *trou noir*, développé dans la théorie de la relativité générale d'Einstein (Montgomery, Orchiston and Whittingham, 2009). Le concept du *trou noir* est resté théorique de 1916, année de publication de la théorie jusqu'à 2019, année où

le monde a vu sa première image reconstituée à partir des données collectées par *Event Horizon Telescope* (Figure 4).

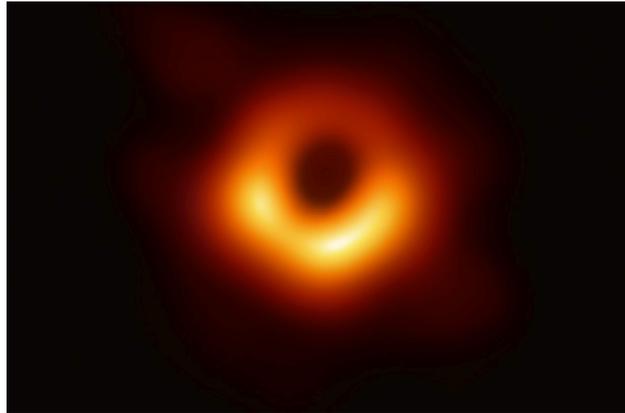


Figure 4. Le trou noir au centre de la galaxie Messier (données capturées par Event Horizon Telescope; source : Radio-Canada)

Au même moment où Newton exposait sa théorie sur la nature corpusculaire, son contemporain Huygens (~1670) suggérait une explication ondulatoire de la lumière (Kennedy, 2014). Huygens pensait que lumière était une onde qui se propageait à travers l'*éther*¹, comme l'onde sonore se propage dans l'air. Il a formulé un principe qui stipule qu'un point qui reçoit une onde d'une certaine amplitude réémet une onde sphérique de même fréquence, même amplitude et même phase (Boschi, 2016). En outre, Huygens a réussi à expliquer le phénomène de la diffraction, mais en supposant que la lumière est une onde « *longitudinale* » voyageant dans un milieu inconnu appelé *éther*.

Newton s'opposa à la théorie de Huygens et lui reprocha de ne pas être en mesure d'expliquer le phénomène de la décomposition de la lumière blanche et de devoir postuler l'existence d'un *éther* qui remplirait l'univers pour expliquer la propagation de la lumière. Pour son interprétation de la diffraction, Newton suppose que celle-ci se produit lorsque les particules de la lumière passent très près du bord pointu d'un corps, ainsi elles sont déviées par des *forces à courte portée*² causées par les particules du bord (Kumar, 1998).

¹ *Éther* est un fluide subtil qu'on pensait remplir tout l'espace (concept abandonnée pas les scientifiques).

² La *force à courte portée* est une force qui agit sur de très petite distances (environ 10^{-15} m), qui se passe au niveau du noyau des atomes (Connor, 2020).

Plusieurs scientifiques étaient convaincus que la théorie corpusculaire de Newton était loin d'être parfaite (Kumar, 1998). Parmi les faiblesses qu'on lui recensait, on trouve son incapacité à donner une explication raisonnable au phénomène de diffraction, et qu'elle représente une violation de la théorie de gravitation universelle, car si la lumière est composée de particules de masses légères, elles devraient subir l'effet de la gravité. Par conséquent, elles ne devraient pas se déplacer en ligne droite. Cependant, en raison de son immense autorité dans la communauté scientifique, il y eut peu de défis à son modèle dans le siècle qui a suivi sa mort en 1727 (*Ibid.*).

En résumé, pour la TD, les connaissances explicitées ci-dessus mettent en relief non seulement le rôle des savoirs conceptuels et de la démarche scientifique dans la construction approfondie des connaissances, mais aussi le développement de la compétence « imagination ». Cette dernière est plus importante pour l'élève, car elle stimule le progrès et suscite l'évolution. Lorsqu'elle est débordante, l'imagination libère la personne des limites du raisonnement déductif, car les novateurs ne sont pas bloqués par un chemin imprécis ou un manque de connaissances, ils imaginent le but, ce qu'ils souhaitent accomplir, et pavent le chemin pour y arriver (Bourgeois-Doyle, 2016).

Théorie ondulatoire

De 1700 à 1800, l'optique semble être considérée comme une science complète, où tout a été dit. Peu de scientifiques osaient contester la théorie corpusculaire de la lumière. Ce fut cependant Thomas Young (1801) qui démontra de manière concluante la nature ondulatoire de la lumière à travers son expérience à doubles fentes. Cette dernière consiste à faire interférer deux faisceaux de lumière homogène (issus d'une même source) en les faisant passer par deux petites fentes percées dans un plan opaque. Sur un écran disposé en face des fentes, on observe un motif de diffraction qui est une zone où alternent des franges sombres et brillantes (Figure 5). Pour expliquer cette observation, Young ne se laisse guère impressionner par l'autorité de Newton, qualifie le modèle corpusculaire de la lumière de « charlatanerie » et se laisse, au contraire, charmer par les explications ondulatoires de Huygens (Gabriel, 2015).

L'expérience de Young a non seulement été décisive pour démystifier la théorie corpusculaire, mais elle continue également à jouer un rôle crucial dans notre compréhension contemporaine de la nature de la lumière. Par exemple, en 2002, la revue *Physics World* a publié les résultats d'une enquête sur les dix plus belles expériences de

physique de tous les temps et l'expérience de Young a fait deux apparitions sur cette liste prestigieuse (Zoubairy, 2016).

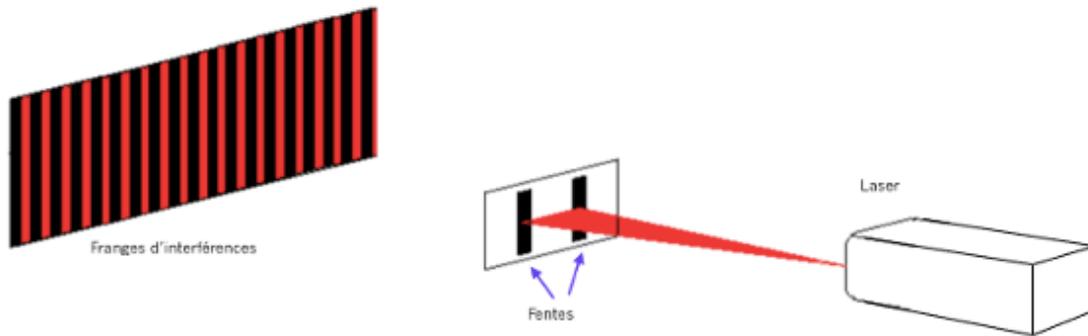


Figure 5. Interféromètre de Young

Bien que l'expérience de Young ait connu un grand succès, elle a suscité beaucoup de controverses à son époque. Certains scientifiques la trouvaient contre-intuitive et se demandaient comment un écran uniformément éclairé par une seule ouverture pouvait développer des franges sombres et brillantes avec l'introduction d'une seconde ouverture. Finalement, la théorie ondulatoire finira par trouver une large acceptation avec les travaux de Fresnel (1819) et la découverte de la polarisation. L'un des apports des travaux de Fresnel à cette théorie est la découverte du caractère transversale des ondes lumineuses contrairement à ce que pensait Huygens.

Même si la théorie ondulatoire a commencé à gagner du terrain dans la communauté scientifique, une question reste toutefois sans réponse : si la lumière est une onde, quelle est la grandeur qui oscille dans le phénomène?

Il revint à James Clerk Maxwell (1831–1879) de compléter l'image de la lumière comme étant constituée d'ondes électromagnétiques (EM). Dans un travail mathématique colossal, Maxwell unifie les champs électrique (\vec{E}) et magnétique (\vec{B}) et développe quatre équations qui portent son nom (Figure 6).

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \rho / \varepsilon & \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 & \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \mu \vec{J} + \mu \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

James Clerk Maxwell
(1831-1879)Figure 6. Les équations de Maxwell (Inspiré de <https://www.biography.com/scientist/james-c-maxwell>)

Lorsqu'on combine les équations de Maxwell, on trouve une équation semblable à l'équation générale des ondes connue en mécanique. Selon la combinaison choisie, on peut trouver une équation du \vec{E} ou celle du \vec{B} . Ainsi, les équations de Maxwell prédisent l'existence d'ondes consistant en la propagation d'une combinaison d'un \vec{E} et d'un \vec{B} transverses. Lorsqu'on résout ces équations, l'une des solutions montre que la vitesse de propagation des \vec{E} et \vec{B} est identique à celle de la lumière. Ainsi, Maxwell conclut que la lumière doit être une onde EM. Cette solution répondait également à la question en suspens sur la nature de la grandeur qui oscille posée à la fin du paragraphe ci-dessus. Selon Maxwell, la lumière est un cas particulier des ondes EM et les grandeurs qui oscillent sont un \vec{E} et un \vec{B} (*Ibid.*).

Par conséquent, les interférences de Young et le développement des équations de Maxwell ont amené à un changement de paradigme dans les dernières années du 19^e siècle : les scientifiques abandonnent la théorie corpusculaire de la lumière et adoptent la théorie ondulatoire (Gabriel, 2015).

En reprenant l'idée de l'*ether* qu'on supposait statique et invisible, Michelson et Morley (1887) réalisent un ensemble de mesures conçues pour détecter le mouvement de la Terre à travers l'*ether* alors qu'elle orbite autour du Soleil (Zoubairy, 2016). Les résultats de leurs mesures leur permettent de conclure que l'hypothèse concernant l'existence du milieu *ether* est fautive. Cependant, la communauté scientifique n'était pas prête à faire le deuil de cette hypothèse.

En 1900, William Thomson, en se demandant comment la Terre pourrait se déplacer dans un solide élastique, relance le débat sur l'*ether* qui cause des problèmes pour le développement des équations qui modélisent les phénomènes naturels (Gabriel, 2015).

En somme, lorsqu'elles sont bien exploitées, les connaissances élaborées dans cette section montrent à l'élève que le savoir savant n'est ni certain ni absolu. Il est toujours sujet de débats et de divergences chez les scientifiques. Ainsi, il écarte l'enseignement des sciences de la perspective métaphysique et dogmatique.

Théorie de dualité onde-corpuscule

Bien qu'il soit associé à Einstein, le phénomène photoélectrique a commencé, entre autres, par les observations de Hertz en 1886 qui a remarqué qu'un électroscope chargé négativement pouvait être déchargé en l'éclairant par une lumière ultraviolette (UV). Ces observations entraient en contradiction avec la théorie ondulatoire de la lumière.

En 1905, Einstein publie ses écrits sur la théorie de la relativité, sujet pour lequel il est le plus connu, et sur la nature de la lumière. Einstein y propose une idée extrêmement simple, mais audacieuse pour expliquer les observations sur l'effet photoélectrique (Figure 7).

En fait, la théorie de la relativité restreinte est basée sur deux postulats: 1) les lois de la physique ne changent pas dans des référentiels inertiels et 2) la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs, quel que soit leur mouvement par rapport à la source de la lumière (Vohnsen, 2004). Dans le vide, cette vitesse est toujours égale à environ 300 000 km/s.

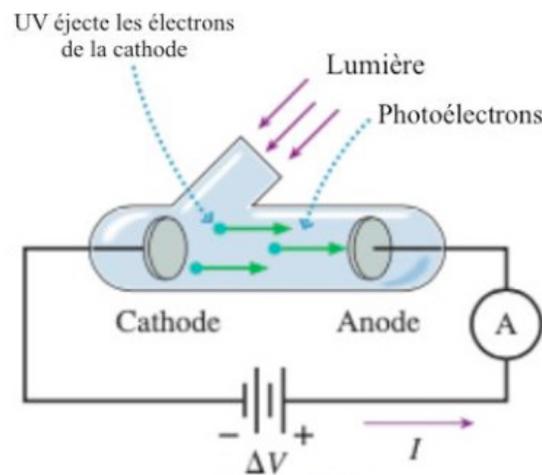


Figure 7. Effet photoélectrique expliqué par Einstein (Knight, 2013)

Einstein a également traité la question de l'*éther* qui avait deux fonctions à l'époque: pour les ondes, il était un support matériel pour les vibrations EM; pour la mécanique, il offrait un cadre de référentiel absolu. Mais la théorie de la relativité restreinte suppose qu'il n'existe pas de référentiel absolu, car tous les cadres inertiels sont équivalents. Par conséquent, l'*éther* disparaît de la littérature scientifique (*Ibid.*).

Pour interpréter l'effet photoélectrique, Einstein suppose que la lumière ne peut pas être une onde continue, elle vient sous forme de faisceaux discrets (paquets d'ondes ou quanta d'énergie). Cette interprétation réintroduit la nature particulière de la lumière, mais sous une autre forme que celle de Newton. Ces particules se distinguent des corpuscules de Newton par le fait qu'elles ne sont pas des particules matérielles, mais des corpuscules quantiques (photons) (Compton, 1926). Dans cette nouvelle perspective, les photons n'ont pas de masse, mais ont une fréquence et une longueur d'onde. Nous voyons ici un caractère double de la lumière, parfois elle se comporte comme une onde et l'autre fois comme un photon: c'est ce qu'on appelle la dualité onde-corpuscule. En 1921, Einstein reçoit le prix Nobel de physique non pas pour ses travaux récents ni pour ses théories sur la relativité, comme beaucoup le supposent, mais pour son explication de l'effet photoélectrique publié en 1905 (*Ibid.*).

Cette nouvelle théorie est poussée plus loin par le développement de l'optique quantique qui synthétise les natures ondulatoire et particulière de la lumière en une seule théorie (De Broglie, 1924). Cette discipline a révolutionné le monde par l'invention des lasers, des fibres optiques, ainsi que par leurs applications en télécommunication, en santé et en astronomie. Elle va bientôt nous fasciner encore par l'embryon en développement dont tout le monde attend la naissance : l'ordinateur quantique.

Finalement, le modèle de dualité onde-corpuscule de la lumière répond à plusieurs questions sur les phénomènes lumineux, mais il ne semble pas parfait. Il se trouve incapable de fournir des explications à certaines observations. À titre d'exemple, les scientifiques se demandent comment la lumière peut, certaines fois, se comporter comme une particule et d'autres fois comme une onde. Un autre défi auquel cette théorie fait face est celui relié à l'expérience de Young. En fait, dans leur article intitulé *Paradox in Wave-Particle Duality*, Afshar, Flores, McDonald et Knoesel (2005) réalisent une expérience à base d'interférence des fentes de Young sous un faible flux de photons. Ils envoient des photons, un après l'autre, vers les fentes et ils ont observé quelque chose qui surprend encore aujourd'hui : même si un photon est envoyé seul, il se localise sur l'écran d'observation comme s'il s'était interféré avec lui-même. Jusqu'à maintenant, cette théorie est incapable de fournir des explications à cette observation. Ceci montre que même la théorie la plus acceptée par la communauté scientifique ne fait pas l'unanimité.

Méthodologie

Dans les pays où il y a plusieurs manuels, il est important de procéder au choix des manuels les plus utilisés par les enseignants (Chaachoua, 2014). En nous inspirant de certaines études qui avaient comme objet l'analyse des manuels en sciences (Duvelay, 1985, Hasni et Roy, 2006; Li *et al*, 2020), nous avons sélectionné deux collections (manuel et guide de l'enseignant) : 1) Synergie – ST (3^e secondaire) (2008), qu'on nomme collection A et 2) Quantum Physique (5^e secondaire) (2010), qu'on nomme collection B.

La raison derrière le choix de ces deux collections se fonde sur le fait qu'elles sont approuvées par le ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport (2004, 2008). Ensuite, elles sont les plus utilisées par les enseignants de la 3^e année et les enseignants de physique de la 5^e (selon les conseillers pédagogiques de deux centres de services scolaires). Le choix des niveaux scolaires est imposé par les instructions du PFEQ (2006) qui prescrivent les concepts d'optique ondulatoire en 3^e année (ST) et les concepts d'optique géométrique en physique en 5^e année.

Pour analyser les manuels, nous recourons à une analyse de contenu dans la perspective de Bardin (2007). Généralement, les phases d'une telle analyse sont la préanalyse, l'exploitation du matériel, et le traitement des résultats, l'inférence et l'interprétation. En premier lieu, nous avons commencé notre analyse par des lectures flottantes qui visent la systématisation du cadre d'analyse d'origine. Ensuite, nous avons procédé à la catégorisation. En outre, nous avons élaboré une grille d'analyse en tenant compte non seulement des dimensions issues du cadre, mais aussi d'autres éléments contextuels, ainsi que des catégories émergentes. Étant donné que la grille est large, elle est placée en annexe.

Résultats

L'un des premiers résultats qui sortent de cette analyse est que les concepts scientifiques sont associés à l'acquisition du vocabulaire et à la mémorisation de certaines définitions. Dans les deux collections, on propose les définitions de quelques concepts scientifiques sans expliquer ni comment ni de quel contexte ils ont émergé, et à la fin des manuels, on propose un glossaire-index qui précise, selon les auteurs, le sens des mots et des expressions couramment utilisés dans les domaines scientifiques. En réalité, pour l'apprentissage, ce n'est pas la liste encyclopédique des savoirs qui est pertinente, il faut passer de la perspective de « *what scientists know* » à la perspective de « *how scientists*

know » (Schwab, 1960, cité dans McComas, 1998), car cette logique met en avant-plan le rôle de la démarche scientifique dans la construction des savoirs.

Analyse des exercices

L'analyse de l'ensemble permet de constater que ne sont considérés comme concepts scientifiques que les termes qui ne sont pas familiers pour l'élève. L'analyse des exercices proposés à la fin du chapitre 5 dans la collection A confirme ce constat. En effet, à la fin du chapitre, 17 exercices ont été proposés (Tableau 2).

Tableau 2. Exercices proposés par la collection A, chapitre 5

Exercices	Nature des questions
1, 2, 4, 5, 6, 7, 13, 14, 15 et 17	Mémorisation, Vrai ou Faux et Qui suis-je?
3	Application de la formule
8, 10 et 16	Traçage des rayons lumineux
9	Description de l'image formée
11	Vérification si les rayons tracés sont géométriquement possibles
12	Analyse

À partir du tableau 2, nous voyons que 10 exercices sur 17 visent la mémorisation des concepts. Trois exercices visent le traçage des rayons lumineux. Comme le souligne Dolan (2009), l'une des plaintes les plus courantes à l'égard des cours de science est que les leçons semblent être une mémorisation inutile d'informations qui n'ont aucun rapport avec la vie des élèves. Ce résultat n'est pas surprenant, il vient corroborer les résultats d'autres études qui ont abordé les manuels en science (Li, *et al.* 2020).

Quant à la collection B, nous avons analysé les 10 exercices proposés à la fin du chapitre 1, qui traite les ondes EM (Tableau 3).

Tableau 3. Exercices proposés par la collection B, chapitre 1 (p. 35)

Exercices	Nature des questions
1, 2, 3, 4, 6, 7, 8	Application de la formule
5	Mémorisation
9 et 10	Analyse

Le tableau 3 montre que la compréhension des concepts scientifiques est associée à l'application technique des formules mathématiques mobilisées dans le texte (7 exercices sur 10). Cette transposition place l'enseignement de la physique dans la forme appelée *El Fadil, 2021*

opérationnalisation excessive. Par conséquent, les élèves auront tendance non seulement à considérer que les savoirs scientifiques à l'école se limitent aux aspects secondaires des savoirs savants, aussi que le but de la science est de fournir des solutions techniques plutôt que des explications approfondies aux phénomènes physiques.

Analyse des définitions

Les définitions des concepts scientifiques fournies dans les deux collections ne permettent pas toujours d'en comprendre le sens. À titre d'exemple, dans la collection A, on définit la fréquence d'une onde comme étant le nombre de cycles par unité de temps, puis on dit que la fréquence se mesure en hertz (Hz). Nous voyons ici une difficulté potentielle en matière de liens pour l'élève : dans la définition, on réfère au nombre de cycles par rapport au temps, alors que son unité est donnée en Hz sans expliquer pourquoi. Aussi, on définit l'amplitude d'une onde en général comme étant la hauteur maximale atteinte par l'onde à partir de la position d'équilibre. Son unité est le mètre (Figure 7).

Les caractéristiques d'une onde

- Les ondes possèdent quatre caractéristiques : la longueur, la fréquence, l'amplitude et la période (pages 296 à 298).

Caractéristique	Définition	Formule
Longueur d'onde (λ)	Distance, mesurée en unités dérivées du mètre, qui sépare deux déformations identiques.	$\lambda = \frac{\text{Distance totale}}{\text{Nombre de cycles}}$
Fréquence (f)	Nombre de cycles produits par unité de temps (habituellement par seconde). La fréquence est exprimée en hertz ou en cycle/sec.	$f = \frac{\text{Nombre de cycles}}{\text{Temps total}}$
Amplitude (A)	Hauteur maximale, mesurée en unités dérivées du mètre, atteinte par l'onde à partir de la position d'équilibre.	$A =$ Hauteur maximale atteinte par l'onde (mesurée avec une règle).
Période (T)	Temps, mesuré en secondes, que met l'onde à effectuer un cycle complet.	$T = \frac{\text{Temps total}}{\text{Nombre de cycles}}$ ou $T = \frac{1}{f}$

Figure 7. Extrait de synthèse sur les ondes (Collection A, p. 315)

Il est évident que le savoir transposé ici est beaucoup éloigné du savoir d'origine. Cela introduit une confusion entre les ondes mécaniques, dont la perturbation se mesure en mètre, et les ondes EM, dont les grandeurs perturbées sont le champ électrique qui se mesure en volt/mètre et le champ magnétique qui se mesure en tesla.

Quant à la collection B, on y dit que l'onde lumineuse est une perturbation EM sans expliquer comment les scientifiques se sont rendus à ce constat. Pourtant, juste à côté, dans *El Fadil, 2021*

la rubrique « Repère », on parle de Maxwell (1831-1879) en indiquant qu'il a formalisé mathématiquement le lien entre les champs électrique et magnétique, ainsi que la propagation des ondes EM. Selon nous, ce repère présente un potentiel pour amener l'utilisateur du manuel à comprendre pourquoi les scientifiques avancent que la lumière est une onde EM en référant à la solution des équations de Maxwell qui accorde la même vitesse à la lumière qu'aux ondes EM. Il est évident que cette transposition dépersonnalise et décontextualise le savoir scientifique.

Analyse des transferts des savoirs

Nous avons essayé de repérer le transfert des savoirs d'un univers à l'autre en analysant le chapitre 1 (collection A) portant sur l'astronomie, qui est intimement lié à la lumière. Les résultats montrent que le « terme » lumière est utilisée à plusieurs reprises, mais dans des situations isolées. À titre d'exemple, on parle de la vitesse de la lumière, de l'année-lumière, des étoiles, mais on définit la lumière comme étant une forme d'énergie rayonnante qui est la principale source d'énergie de la Terre. Force est de constater qu'il y a une confusion entre la lumière comme entité indépendante et sa source comme objet. Par inférence, nous pouvons comprendre l'origine des résultats trouvés par Castro (2013) et Guesne (1985) qui soulignent que la plupart des élèves du secondaire n'arrivent pas à distinguer la lumière de sa source. Cette forme de TD, dite désyncrétisation, risque de masquer des liens et de la cohérence de l'organisation des savoirs à l'élève.

Obstacles à l'apprentissage

Modélisation

En science, on n'aborde pas les connaissances comme des vérités, mais comme des modèles (Bengloan et Nichele, 2012). Ces derniers ne peuvent jamais représenter un phénomène naturel dans son ensemble, ils constituent des représentations réduites du phénomène réel. Si l'enseignant ne prend pas suffisamment de temps pour mettre en évidence la distinction entre un modèle et la réalité, il sera difficile pour l'élève d'accéder au modèle et de voir ses limites, et par conséquent, il aura de la difficulté à l'utiliser (*Ibid.*). Dans les collections analysées, nous avons constaté un problème de modélisation trop éloigné du modèle scientifique. Ce problème consiste en certaines équations mathématiques fournies dans le manuel B. À titre d'exemple, l'équation utilisée pour modéliser les ondes est $c = \lambda \cdot f$ (c est la vitesse de la lumière, λ est la longueur d'onde, et f est la fréquence d'oscillation). Cette équation est présentée comme étant l'équation universelle des ondes, alors que dans les illustrations, on montre toujours les ondes à l'aide

de formes sinusoïdales. Subséquemment, comment un élève peut-il faire des liens entre la forme sinusoïdale de l'onde et la simple équation inverse telle que $c = \lambda \cdot f$ qui est appelée équation universelle des ondes ? Cette forme de TD opérationnalise excessivement le savoir scientifique.

Ensuite, on fait une analogie entre les ondes mécaniques et les ondes EM, puis on définit le front d'onde comme étant une ligne imaginaire qui relie tous les points touchés par l'onde au même instant. Le savoir transposé ici est trop éloigné du savoir savant. Concrètement, les ondes EM ne sont pas des ondes surfaciques planes, elles se génèrent en formes sphériques (principe de Huygens). Par conséquent, le front d'onde, dans une direction donnée, est une surface tangente à la sphère, pas une ligne. Par conséquent, l'élève ne sera pas en mesure de donner du sens à un tel concept abstrait tel que le front d'onde.

Mélange des champs théoriques

L'un des défis majeurs qui ont émergé dans cette étude est que les collections mélangent d'une part les modèles théoriques qui s'opposent, et d'autre part les modèles et les réalités expérimentales. En conséquence, les apprenants finissent par croire que non seulement il y a un seul modèle théorique universel pour la lumière, mais aussi que les concepts scientifiques appartiennent au monde réel (Bengloan et Nichele, 2012). Ce mélange amène une difficulté majeure par rapport aux liens entre les différents concepts utilisés.

À titre d'exemple, dans les manuels, on modélise la lumière à l'aide de lignes droites. Cependant cette dernière n'a pas la même signification dans le cadre de l'optique géométrique et dans celui de l'optique ondulatoire. Pratiquement, dans l'optique géométrique, on trace la ligne droite pour illustrer la trajectoire empruntée par des particules de la lumière pendant leur déplacement; alors que pour l'optique ondulatoire, la droite représente la direction perpendiculaire au front d'onde.

Aussi, dans le chapitre 1 (collection B), on présente la lumière comme étant une onde EM et dans le même chapitre, on change brutalement vers l'optique géométrique qui puise ses racines dans la théorie corpusculaire. En plus, toutes les activités proposées dans le guide de l'enseignant sont de nature géométrique. Du point de vue épistémologique, le modèle du rayon lumineux se veut neutre par rapport à la nature de la lumière. Il prend ses distances par rapport aux modèles théoriques ondulatoire et corpusculaire (Raftopoulos, Kalyfommatou, et Constantinou, 2005). Cependant, les deux collections prennent position en introduisant la lumière comme étant une onde EM.

En réalité, la thèse principale avancée par Newton pour justifier son utilisation du concept du rayon lumineux n'est pas neutre. Il a adopté ce modèle afin d'éviter la polémique entre les deux camps. Or, la construction de ce modèle était guidée par des hypothèses ontologiques très chargées par la nature corpusculaire de la lumière (*Ibid.*).

Bien que les directives du PFEQ (2006) indiquent que l'optique géométrique s'appuie sur le concept du rayon lumineux, le programme ne constitue pas un texte de savoir. Il est de la responsabilité du manuel, qui constitue sa prolongation transposée, de compléter la TD des savoirs savants, de préciser la construction théorique du rayon lumineux, de présenter l'histoire de la lumière et d'autres contenus, ainsi que leur structuration et leur contextualisation. En fait, l'histoire des sciences est didactiquement pertinente, car elle permet à l'enseignant de prendre du recul sur un concept donné, d'examiner son évolution historique, la manière dont il s'est construit et développé au cours du temps (Décamp, 2014).

En outre, si les savoirs scientifiques sont toujours au cœur des discussions entre les scientifiques, pour les manuels, ils semblent être des vérités absolues. Il n'y a pas de place pour le doute dans les deux collections.

Élargir la discussion

Nous avons constaté pendant l'analyse que le concept du *vide*, introduit dans les deux collections, est fortement relié à la propagation de la lumière sans y être défini. Même si le vide peut paraître anodin, didactiquement, il mérite une attention particulière afin de préciser sa nature qui pourrait être introduite selon le niveau de l'élève. Le premier niveau peut référer à la conception de base : un verre vide, une bouteille vide, etc. Cela dit, il y a absence de toute substance visible à l'œil alors qu'on sait qu'il y a de l'air dans le contenant. Le deuxième niveau peut renvoyer au vide absolu qui veut dire l'absence de matière et d'énergie. Mais, dans cette conception, on fera face à deux paradoxes. Le premier est celui de la propagation de la lumière provenant des étoiles et qui traverse le vide interstellaire : si le vide est exempt d'énergie, alors la lumière ne pourra pas le traverser. Ainsi, la Terre sera privée de lumière à cause du vide. Le deuxième paradoxe est celui relié au concept de température. En science, on introduit la température comme étant la mesure de degré d'agitation des particules qui composent une substance. Techniquement, le thermomètre - composé d'un tube capillaire et d'un réservoir de mercure ou alcool - mesure l'énergie moyenne transférée, à travers des collisions, entre les particules de la substance et le réservoir. Le paradoxe ici est la température indiquée par un thermomètre placé dans le

vide. S'il n'y a pas de particules, il n'y aura pas de collisions. Subséquemment, deux hypothèses s'imposent. 1) La température restera identique à la température initiale indiquée par le thermomètre avant de le placer dans le vide. Dans cette conception, le vide assume la fonction d'un isolant thermique parfait. 2) Le thermomètre n'indiquera aucune température! Le troisième niveau du vide peut renvoyer à un espace sans matière, mais où l'énergie peut exister. Mais, avec l'arrivée de la physique moderne, le concept du vide prend une nouvelle forme (4^e niveau). Selon *Futura-sciences* (1997), le vide est un milieu dans lequel la pression est beaucoup plus faible que la pression atmosphérique et où l'énergie est à son minimum. Dans cette nouvelle conception, le vide ne représente plus l'absence de matière, alors il ne serait donc pas vraiment « vide » au sens commun du terme. S'il y a de la pression, il y a automatiquement des particules gazeuses qui exercent cette pression. Cela nous amène à la question posée par le physicien Étienne Klein (2019): « de quoi le vide est-il plein ? ».

Finalement, pour la TD, le manuel est le fruit d'une première transformation du savoir savant en savoir à enseigner. Dans la nature des choses, l'enseignant s'appuie sur le manuel et planifie son enseignement. Mais nous savons que dans chaque passage d'un niveau à l'autre, il y a une forme de perte de savoir. Si les manuels contiennent plusieurs lacunes, il y a une très grande probabilité que ces faiblesses se transfèrent au deuxième niveau interne de la TD (savoir enseigné) et par la suite, elles glisseront automatiquement au dernier niveau, celui de l'élève et du savoir assimilé.

Même si nous n'avons pas accès au dernier niveau de la TD, nous pouvons faire des inférences et de savoir si le concept en jeu d'apprentissage est suffisamment proche du savoir savant qui est à son origine ou pas. En réalité, le savoir à enseigner tel qu'il apparaît dans les manuels étudiés ne fait pas référence à des expériences précises contextualisées, conduit à des généralisations parfois prématurées, ne borne pas les concepts abordés, en peu de mots conduit à une fermeture du discours et à une dogmatisation qui limite la progression du savoir scientifique chez l'élève. Par leur manque de cohérence et d'intégration des dimensions épistémologiques et historiques, les manuels véhiculent des formes de savoir didactiquement indésirables telles que la dogmatisation, la décontextualisation, la dépersonnalisation, la désyncrétisation et l'opérationnalisation excessive des savoirs. Bref, nous pouvons constater, par inférence, qu'il est difficile, voire impossible, pour l'élève de construire un portrait cohérent de la nature de la lumière en se basant sur l'un ou l'autre des manuels.

Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que les manuels analysés n'abordent pas les trois concepts essentiels à la compréhension de la nature de la science en général et celle de la lumière en particulier: les modèles théoriques, l'histoire des sciences et la place du doute. Plus spécifiquement, nous avons constaté que les manuels présentent de grandes lacunes en ce qui touche les transformations des savoirs entre les différents niveaux de la TD. D'une part, la manière de considérer les théories qui encadrent l'optique témoigne d'un manque de réflexion : l'optique de la 5^e secondaire est de nature géométrique, mais elle est présentée en mélangeant les deux théories qui s'opposent sans le préciser. D'autre part, les concepts utilisés semblent isolés, ce qui engendre une difficulté supplémentaire pour l'élève.

Par ailleurs, dans les deux manuels, le savoir semble cohérent et parfaitement stabilisé, alors que l'histoire de la lumière montre une grande instabilité des concepts de l'optique. Donc, nous constatons que la manière par laquelle la TD est introduite dans les collections conduit à une dogmatisation du savoir à enseigner. Trois explications nous paraissent plausibles à cette situation. La première est d'ordre socio-politique. Elle tient au statut général de la science dans la société. Dans cette logique, la science est constituée par un ensemble de connaissances objectives, rigoureuses, universelles qui s'opposent aux autres formes de connaissances humaines et sociales. De là découle l'idée que la science est indépendante des systèmes sociaux et économiques au niveau de sa recherche de la vérité (Develay, 1985). Dans cette perspective transmissive, seul l'enseignant sait [à travers le manuel]. Alors, si l'enseignant sait la vérité, il n'a qu'à conduire l'élève dans l'univers du savoir scientifique. On voit cela du fait que les manuels ne laissent pas la place au doute.

La deuxième explication est d'ordre institutionnel. Elle tient à l'absence de liens entre les lieux et les personnes qui élaborent le savoir savant et les PSR (laboratoires, institutions, société) et les lieux (ministère de l'Éducation) où il y a des personnes qui sélectionnent les savoirs à enseigner. Ce manque d'interaction amène à la perte de liens et de références entre les savoirs savants d'une part, et les savoirs à enseigner d'autre part. Par conséquent, comme le souligne Develay (1985), le savoir à enseigner tire ses origines des ouvrages de vulgarisation simplificateurs et dogmatiques par rapport aux recherches scientifiques qui ne se contentent pas seulement des résultats, mais aussi détaillent la méthodologie, les expériences entreprises, les techniques, la problématique et la bibliographie du chercheur.

La troisième explication est d'ordre épistémologique. Elle tient au statut de la physique chez laquelle les concepts abstraits, les lois et les théories occupent une position particulière par rapport aux autres disciplines. L'histoire de l'optique a subi plusieurs changements de paradigmes et ses modèles théoriques ne sont pas encore stabilisés. Cela

laisse les concepteurs de manuels, qui se basent sur les textes de vulgarisations, égarés entre différentes postures et théories.

Finale­ment, l'analyse transpositive présentée ici appelle à être poursuivie au niveau des pratiques de classe, à la fois par une analyse des activités mobilisées par les enseignants et par une analyse des évaluations des apprentissages des élèves et la mise en relief des difficultés auxquelles ils peuvent faire face. Cette future recherche devrait permettre d'affiner et vraisemblablement de reconsidérer nos hypothèses concernant l'enseignement des savoirs de la lumière dans le cadre de l'optique géométrique et ondulatoire.

Références

- Abd-El-Khalick, F., Waters, M., et An-Phong, L. (2008). Representations of nature of science in high school chemistry textbooks over the past four decades. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(7). <https://doi.org/10.1002/tea.20226>.
- Afshar, S.-S., et al. (2007). Paradox in wave-particle duality. *Foundations of Physics*, 37(2). DOI:[10.1007/s10701-006-9102-8](https://doi.org/10.1007/s10701-006-9102-8).
- Al-Khalili, J. (2014). *The Secrets of Quantum Physics, The beginning and End of the Universe*. <https://www.youtube.com/watch?v=yNntDhr2n4g>.
- Al-Salihi, K. (2008). *Al-Basri pinhole camera laid the foundations for the later development of modern sophisticated Conf*. https://www.researchgate.net/publication/259364424_Al_Basri_pinhole_camera_laid_the_foundations_for_the_later_development_of_modern_sophisticated_Conf.
- Andersson, B. et Karrqvist, C. (1983). How Swedish Pupils, Aged 12 - 15 Years, Understand Light and its Properties. *European Journal of Science Education* 5(4). <https://doi.org/10.1080/0140528830050403>.
- Anderson, C.-W. et Smith, E.-L. (1986). *Children's conceptions of light and color: understanding the role of unseen rays Technical Report*. Michigan: The Institute for Research on Teaching. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED270318.pdf>.
- Bächtold, M. (2014). L'équation $E_{libérée} = |\Delta m|c^2$ dans le programme et les manuels de Première S. *Recherche en didactique des sciences et des technologies*, 10. <https://doi.org/10.4000/rdst.939>.
- Bardin, L. (2007). *L'analyse de contenu*. Paris: Presses universitaires de France.
- Bensaada, A. et Ouellette, B. (2010). *Quantum Physique - 2^e cycle (3^e année) - Manuel de l'élève*. Montréal : Chenelière.
- Blizak, D., Chafiqi, F., et Kendil, D. (2009). *Students' misconceptions about light in Algeria*. Optical Society of America. DOI:[10.1364/ETOP.2009.EMA5](https://doi.org/10.1364/ETOP.2009.EMA5).

- Castro, D. (2013). Light mental representations of 11-12 year old students. *Journal of social science research*, 1(1). <https://doi.org/10.24297/jssr.v1i1.3055>.
- Chaachoua, H. (2008). *Le rôle de l'analyse des manuels dans la théorie anthropologique de la didactique*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01519339/document>.
- Chartré, C. et Levert, I. (2008). *Synergie - 2^e cycle (1^{re} année) - Manuel de l'élève ST-ATS*. Montréal : Chenelière.
- Chevallard Y. (1985). *La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné*. Grenoble : La Pensée Sauvage.
- Clerc, J.-B., Minder, P. et Roduit, G. (2006). *La transposition didactique*. Lausanne: HEPL. <https://lyonelkaufmann.ch/histoire/MHS31Docs/Seance1/TranspositionDidactique.pdf>.
- Connor, N. (2020). *Quelle est la force fondamentale de la nature – Quatre forces fondamentales – Définition*. <https://www.radiation-dosimetry.org/fr/quelle-est-la-force-fondamentale-de-la-nature-quatre-forces-fondamentales-definition/>.
- Constantinou, R. et al. (2005). The Properties and the Nature of Light: The Study of Newton's Work and the Teaching of Optics. *Science and Education*, 14, 649–673.
- De Broglie, L. (1924). *Philosophical Magazine*, 47. <http://dx.doi.org/10.1080/14786442408634378>.
- Décamp, N. (2021). *De l'exploration de quelques liens entre histoire des sciences, compréhension conceptuelle et attitude critique*. Note de synthèse pour l'habilitation à diriger des recherches, Université de Paris. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03117071>.
- Develay, M. (1992). *De l'apprentissage à l'enseignement*. Paris: ESF.
- Develay, M. (1987). À propos de la transposition didactique en sciences biologiques. *Aster*, 4. <https://core.ac.uk/download/pdf/15490734.pdf>.
- Dolan, T., Nichols, B. et Zeidler, D. (2009). Using Socio-Scientific Issues in Primary Classrooms. *Journal of Elementary Science Education*, 21. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ849717.pdf>.
- Driver, R., Guesne, E., et Tiberghien, A. (1985). Some features of children's ideas. Dans Driver, R., Guesne, E., and Tiberghien, A. (dir.), *Children's Ideas in Science* (193–201). Philadelphia: Open University Press.
- Elgar, A.-G. (2004). Science textbooks for lower secondary schools in Brunei: Issues of gender equity. *International Journal of Science Education*, 26(7). <https://doi.org/10.1080/0950069032000138888>.
- Futura Science (1997). *Sciences -Vide*. <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-vide-1997/>.

- Gabriel, C. (2015). *Petite histoire de la lumière et des théories de l'optique*. <http://www.claudegabriel.be/Optique>.
- Gilbert, J.-K., Boulter, C.-J., et Rutherford, M. (2000). Explanations with Models in Science Education. In J.-K. Gilbert et C.-J. Boulter (dir.), *Developing Models in Science Education* (193–208). Dordrecht: Kluwer.
- Gouvernement du Québec (2004). *Programme de formation de l'école québécoise. Enseignement secondaire*. Québec: Ministère de l'Éducation, du Loisiret du Sport. <http://www.education.gouv.qc.ca/enseignants/pfeq/secondaire/>.
- Groves, F. H. (1995). Science Vocabulary Load of Selected Secondary Science Textbooks. *School Science and Mathematics*, 95(5). <https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.1995.tb15772.x>.
- Guesne, E. (1985). Light. Dans Driver, R., Guesne, E. et Thiberghien, A. (dir.), *Children's ideas in Science*. Philadelphia: Open University Press.
- Hasni, A., Moresoli, C., Samson G. et Owen, M-É. (2008). Points de vue d'enseignants de sciences au premier cycle du secondaire sur les manuels scolaires dans le contexte de l'implantation des nouveaux programmes au Québec. *Revue des sciences de l'éducation*, 35(2). <https://doi.org/10.7202/038730ar>.
- Hasni, A. et Roy. P. (2006). Comment les manuels scolaires proposent-ils d'aborder les concepts scientifiques avec les élèves? Cas des concepts de biologie. Dans J. Lebrun, J. Bédard et A. Hasni (dir.). *Matériel didactique et pédagogique : Soutien à l'appropriation ou déterminant de l'intervention éducative* (125-162). Ste Foy : Presses de l'Université Laval.
- Hooke, R. (1672). *Robert Hooke's Critique of Newton's Theory of Light and Colors*. <http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/NATP00005>.
- Hubisz, J. (2003). Middle-school texts don't make the grade. *Physics today*. <http://www.physicstoday.org/vol-56/iss-55/p50.html>.
- Kennedy, B. (2014). *Newton, Hooke & their Competing Theories of Light*. Isaac's Eye, season. <https://www.writerstheatre.org/blog/newton-hooke-competing-theories/>.
- King, C.-J.-H. (2010). An analysis of misconceptions in science textbooks: Earth science in England and Wales. *International Journal of Science Education*, 32(5). <https://doi.org/10.1080/09500690902721681>.
- Klein, É. (2019). *De quoi le vide est-il plein?* <https://www.youtube.com/watch?v=ekLcVnqqhao>.
- Knight, R.-D. (2013). *Physics for Scientists and Engineers – A Strategic Approach*. New York: Pearson.
- Kumar, A. (2006). Newton's Contribution to Optics. *Resonance 11*. <https://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02903080>.

- Li, X. et al. (2020). Analysis of Five Junior High School Physics Textbooks Used in China for Representations of Nature of Science. *Research in Science Education*, 50. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018RScEd..50..833L/abstract>.
- Laplace, P.-S. (2009). *Exposition du Système du Monde* (1^e Édition : 1796). Cambridge Library Collection.
- Lumpe, A.-T. et Beck, J. (1996). A profile of high school biology textbooks using scientific literacy recommendations. *The American Biology Teacher*, 58, 147-153.
- Martinand, J.-L. (1986). *Connaître et transformer la matière*. Berne : Peter Lang.
- McComas, W. et Almazroa, H. (1998). The Nature of Science in Science Education : An Introduction. *Science and Education*, 7. <https://doi.org/10.1023/A:1008642510402>.
- Mensouri, D. (1994). *Essai de délimitation en termes de problématiques des effets de contrat et de transposition : le cas des relations entre droites et équations dans les classes de Seconde et de Première* (Thèse de doctorat). Grenoble: Université Joseph Fourier. <http://www.theses.fr/1994GRE10122>.
- Michaud, L. (2019). *L'effet des écrans et de l'environnement scolaire, y compris les panneaux intelligents, sur le développement visuel et l'apprentissage des enfants* (Mémoire). Université de Montréal. <https://lecoledelavue.ca/uploads/memoire-sur-l-effet-des-ecrans-opinion-de-3-experts-dans-leur-domaine.pdf>.
- Montgomery, C. Orchiston, W. et Whittingham, I. (2009). Michell, Laplace and the origin of the black hole concept. *Journal of Astronomical History and Heritage* 12(2). https://www.researchgate.net/publication/228571550_Michell_Laplace_and_the_origin_of_the_black_hole_concept.
- Newton, I.-S. (1687). *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. London: Royal Society. http://classiques.uqac.ca/classiques/newton_isaac/principes_math_philo_naturelle/principes_philo_naturelle_t1.html.
- Philippe, J. (2004). La transposition didactique en question : pratiques et traduction. *Revue Française de Pédagogie*, 149. https://www.persee.fr/doc/rfp_0556-7807_2004_num_149_1_3170.
- Pizzini, E.-L., Shepardson, D.-P., et Abell, S.-K. (1992). The questioning level of select middle school science textbooks. *School Science and Mathematics*, 92. [doi/10.1111/j.1949-8594.1992.tb12145.x](https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.1992.tb12145.x)
- Raftopoulos A., Kalyfomatou N., et Constantinou C.-P. (2005). The Properties and the Nature of Light: The Study of Newton's Work and the Teaching of Optics. *Science and Education* 14. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11191-004-5609-6>.

- Roychoudhuri, C. (2019). *Do We Manipulate Photons or Diffractive EM Waves to Generate Structured Light?*. <https://www.intechopen.com/books/single-photon-manipulation/do-we-manipulate-photons-or-diffractive-em-waves-to-generate-structured-light->.
- Schwab, J. J. (1964). The Teaching of Science as Enquiry. Dans J.-J. Schwab et P.-F.-B. Brandwein (dir.). *The Teaching of Science (1580 -1626)*. Massachusetts: Harvard University Press.
- Science Questions with Surprising Answers (2013).
<https://wtamu.edu/~cbaird/sq/2013/06/11/why-doesnt-light-carry-momentum/>.
- Tiberghien, A., Delacote, G., Ghiglione, R. et Matalon, B. (1980). Conceptions de la lumière chez l'enfant de 10 - 12 ans. *Revue Française de Pédagogie*, 50, 24-41.
- Thouin, M. (2009). *Enseigner les sciences et technologies*. Montréal : Multimondes.
- Uzun, S., Alev, N. et Karal, I.-S. (2013). A cross-age study of an understanding of light and sight concepts in physics. *Science Education International*, 24(2).
https://www.researchgate.net/publication/281339645_A_cross-age_study_of_an_understanding_of_light_and_sight_concepts_in_physics.
- Valverde, G.-A., et al. (2002). *According to the book: using TIMSS to investigate the translation of policy into practice through the world of textbooks*. Dordrecht: Kluwer.
- Vohnsen, B. (2004). A short history of optics. *Physics Scripta*, 109.
[DOI:10.1238/PHYSICA.TOPICAL.109A00075](https://doi.org/10.1238/PHYSICA.TOPICAL.109A00075).
- Zoubairy, S. (2016). *A very brief history of light*. Texas University.
<https://eacpe.org/app/wp-content/uploads/2017/04/A-Very-Brief-History-of-Light.pdf>.

ANNEXE: Grille d'analyse des concepts et activités optiques dans les manuels scolaires

Informations générales	
Référence du manuel	
Niveau scolaire	
Année de publication	
Unité ou chapitre visé	
Pages concernées	

Le contenu sélectionné pour l'analyse

Collection	Chapitres	Nombre de pages
Collection A		
Collection B		

1. Dans chaque chapitre d'optique, présente-t-on clairement

	Oui	Non
La structure		
Les objectifs		
Les définitions des concepts clés		
Les contenus mathématiques adéquats		

2. Le manuel contient-il un aspect culturel?

	Oui	Non
Y a-t-il des notes biographiques?		
Présente-t-il des références à l'histoire des connaissances optiques?		
Contient-il des références bibliographiques pour permettre un approfondissement de la compréhension (revues, livres, romans, logiciels, sites Internet, simulations, etc.)?		
Est-ce que les concepts, loi ou théorie sont-ils placés dans leur contexte historique et d'émergence?		
Présente-t-il les différents modèles et théories qui s'opposent?		
Montre-t-il les limites de chaque modèle ou théorie?		
Présente-t-il le changement de paradigme?		

3. Activités préparatoires

a. Le manuel présente-t-il des activités préparatoires au concept à l'étude?

Oui	Non

b. Si oui, sont-elles opportunes?

4. Quels sont les concepts, lois ou théories optiques ciblés par l'activité?

5. Y a-t-il d'autres concepts connexes qui font l'objet d'un apprentissage par l'activité?

6. Est-ce que les concepts, loi ou théorie sont-ils définis? Oui Non

Si oui, comment sont-ils définis?

7. Présente-t-il des activités d'application par ordre de difficulté croissantes?

8. Les activités présentées sont-elles centrées sur

- L'élève? (Est-ce que l'élève est engagé dans une recherche en lien avec l'appropriation des concepts considérés?)
- L'enseignant (Comme expert)?
- La résolution des exercices d'application de base? (Comme tracer les lignes pour former l'image seulement)
- Le savoir?

9. Est-ce que les concepts sont mis en relation avec d'autres concepts dont ils dépendent?

	Oui	Non
Explicitement		
Implicitement		

Si oui, comment?

.....
.....

10. Est-ce que le manuel mobilise des différentes approches d'apprentissage?Oui Non Si oui, lesquelles?**11. Est-ce que le manuel fait référence aux niveaux de formulation de concepts considérés?**

	Oui	Non
Explicitement		
Implicitement		

Si oui, comment?

Si non, est-ce que le niveau de formulation correspond au niveau des élèves?

12. Cohérence avec le PFEQ

	Oui	Non
Respecte-t-il les attentes du programme?		
Respecte-t-il la progression des apprentissages.		
Encourage-t-il l'interdisciplinarité?		
Favorise-t-il les démarches scientifiques?		
Utilise-t-il un langage scientifique spécifique à l'optique?		

Notes :