



HAL
open science

Enrichir le modèle de propagation de la lumière en intégrant la vitesse au cycle 4

Yannick Duplan

► **To cite this version:**

Yannick Duplan. Enrichir le modèle de propagation de la lumière en intégrant la vitesse au cycle 4. Education. 2022. dumas-04530352

HAL Id: dumas-04530352

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04530352>

Submitted on 3 Apr 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



Master MEEF « Métiers de l'Enseignement, de l'Éducation et de la Formation »

Mention *Second degré*

Parcours : *Physique-Chimie*

Mémoire de master

Année universitaire 2021 – 2022

**ENRICHIR LE MODÈLE DE PROPAGATION DE LA LUMIÈRE EN
INTÉGRANT LA VITESSE AU CYCLE 4**

YANNICK DUPLAN

Directrice de mémoire : Mme. Valérie MUNIER

Membres du jury de soutenance : Mme. Valérie MUNIER et M. David CROSS (LIRDEF – Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Didactique, Éducation et Formation)

Soutenu le 19 mai 2022



RÉSUMÉ

Titre du mémoire :

Enrichir le modèle de propagation de la lumière en intégrant la vitesse au cycle 4

Résumé du mémoire :

Ce mémoire porte sur l'enseignement du modèle de propagation rectiligne de la lumière en cycle 4. Il s'agit de tester la pertinence d'enrichir le modèle optique du rayon lumineux, qui rend compte de la trajectoire de la lumière, en intégrant la vitesse de propagation de celle-ci. Les résultats d'une expérimentation menée avec deux classes de 5^e montrent que l'introduction de ce « modèle enrichi » semble permettre aux élèves de prendre conscience du caractère fini de la vitesse de la lumière et du fait que cette vitesse ne dépend pas de la source mais du milieu de propagation.

Mots-clés : Physique, collège, cinquième (5^e), modélisation, lumière, célérité.

Version anglaise / *English version*

Title of the thesis:

Enriching the light propagation model in integrating speed in cycle 4

Abstract of the thesis:

This dissertation deals with teaching the rectilinear propagation model of light in cycle 4 (French system). It is a question of testing the relevance to enrich the optical model of light ray, which accounts for the light trajectory, by integrating the propagation speed of this one. The results from an experience led with two 5th-classes show that the introduction of this “enriched model” seems to allow pupils to become aware of the finite nature of the speed of light and of the fact that this speed does not depend on the source but on the propagation medium.

Keywords: Physics, middle school, fifth (5th French grade or American grade 7), modelling, light, celerity.

REMERCIEMENTS

Je remercie, en premier lieu, Mme. Valérie Munier pour son engagement, son dévouement, ses conseils et sa bienveillance envers mon (notre) travail qui est rendu aujourd'hui, mais aussi pour la confiance qu'elle m'a accordée pour composer et soutenir un sujet sur la lumière qui me tenait à cœur. Son expérience dans les domaines de la didactique, de l'éducation et de la formation, de même que son expertise en recherche, ont été autant de facteurs qui m'auront encouragé à développer une démarche rigoureuse, de même que des idées et des résultats expérimentaux les plus exaltants possibles. Je remercie, en deuxième lieu, Mme. Pascale Segur (ma tutrice de stage) pour l'investissement énorme dont elle a fait preuve envers moi pour que je puisse avoir les clés en main dans ce métier. Son accompagnement dans ma pratique et dans ma pratique didactique aura été précieux.

Je remercie, en troisième lieu, les enseignants et formateurs de l'Inspé (Institut National Supérieur du Professorat et de l'Éducation) pour avoir livré les outils et méthodes afin d'être le plus équipé possible dans l'exercice de la profession, en autonomie comme en travail d'équipe. Pareillement, je remercie les formateurs académiques et évaluateurs pour leurs comptes-rendus descriptifs, livrant des points positifs et valorisants en plus d'éléments de progression (points de questionnements et d'amélioration) avant la fameuse visite d'inspection. Je remercie, en quatrième lieu, les élèves du collège qui ont participé, sans réellement être avertis, à ce projet. C'est bien grâce à eux et à leur implication que des données ont été acquises. C'est aussi grâce et pour eux que les activités ont été pensées. De la même manière, je remercie le collège qui m'a accueilli et le personnel du collège pour leur soutien. Je pense notamment à la principale adjointe, pour sa compréhension dans mon organisation sans laquelle je n'aurais pu terminer cette recherche à temps. Enfin, je remercie mes camarades de promotion dont les discussions, retours et partages ont pu servir quotidiennement. Je remercie, dernièrement, l'assesseur de la soutenance de ce mémoire, M. David Cross.

La rédaction s'est faite en tant qu'étudiant en deuxième année de master (M2), lauréat du concours du CAPES externe de la section physique-chimie en 2021, qui se cumule au poste de fonctionnaire stagiaire (à mi-temps). L'année de ce double statut d'étudiant et de professeur aura été difficile à tenir et d'une *lueur* intense (*confer* oxymore), mais elle fut aussi enrichissante, m'ayant conduit à aller plus loin que le seul champ disciplinaire.

SOMMAIRE

Table des matières

I) Introduction, cadre d'étude	7
II) Annonce du plan.....	8
III) État de l'art.....	9
III) 1. Le modèle de propagation de la lumière : éléments de contenu et construction historique 9	
III) 1. i. Nature de la lumière	9
III) 1. ii. Modèle du rayon lumineux (définition en optique géométrique).....	11
III) 1. iii. Vitesse (finie) ou célérité de la lumière ?	12
III) 1. iv. Vitesse de la lumière fonction du milieu de propagation	14
III) 2. Conceptions des élèves sur la lumière	15
III) 2. i. Apport de l'histoire dans l'enseignement (cas de la vision et de la vitesse)	15
III) 2. ii. Conceptions sur la nature de la lumière	16
III) 2. iii. Conceptions sur la vision.....	18
III) 2. iv. Conceptions sur la vitesse.....	20
IV) Problématique et méthodologie	24
IV) 1. Formulation de la problématique.....	24
IV) 2. Méthodologie.....	26
IV) 2. i. Étude préliminaire	26
IV) 2. ii. Étude expérimentale	27
V) Étude comparative de l'enseignement de la lumière et de la célérité de la lumière	29
V) 1. Grille d'analyse critériée.....	29
V) 2. Application de la grille d'analyse critériée	30

V) 2. i.	Critères généraux.....	30
V) 2. ii.	Le modèle du rayon lumineux.....	32
V) 2. iii.	La vitesse de la lumière.....	36
V) 2. iv.	Progression.....	41
V) 2. v.	Récapitulatif.....	42
VI)	Situation expérimentale.....	44
VI) 1.	Analyse <i>pré</i> -test pour la construction d'un modèle.....	44
VI) 1. i.	Présentation du <i>pré</i> -test.....	44
VI) 1. ii.	Résultats du <i>pré</i> -test et représentation des conceptions.....	46
VI) 2.	Activités pour la construction d'un modèle.....	51
VI) 2. i.	Activité documentaire « Est-ce que la vitesse de la lumière est infinie ? ».....	51
VI) 2. ii.	Activité documentaire « Quelle est la vitesse de la lumière dans un milieu différent du vide ? » 55	
VI) 3.	Évaluation sommative et analyse <i>post</i> -test pour la construction d'un modèle.....	58
VI) 3. i.	Évaluation sommative pour la construction d'un modèle (présentation).....	58
VI) 3. ii.	Évaluation sommative pour la construction d'un modèle (résultats).....	60
VI) 3. iii.	Analyse <i>post</i> -test (présentation).....	63
VI) 3. iv.	Analyse <i>post</i> -test (résultats).....	64
VII)	Conclusion et réponse à la problématique.....	77
VIII)	Perspectives proposées.....	79
IX)	Références bibliographiques.....	81
X)	ANNEXES.....	88

INTRODUCTION

I) Introduction, cadre d'étude

Fiat lux, « que la lumière soit ! » : une étude réflexive sur la représentation de la lumière par le modèle du rayon lumineux constitue le thème de cet écrit.

Le rayon lumineux modélise la propagation rectiligne (*i.e.* trajet en ligne droite) de la lumière. Il rend compte : de la direction empruntée (à l'aide d'une droite) et du sens suivi (à l'aide d'une flèche) ; la lumière est alors symbolisée par une portion de droite fléchée. L'image de la **Figure 1** est prise de l'évaluation sommative mise en œuvre pour des élèves de cycle 4 (au collège), dans le cadre de cette étude. Deux rayons issus d'une source de lumière (lampes torches) sont dirigés vers un point précis (une croix ×), et sachant que la même distance est parcourue, ils ne mettent pas le même temps pour parcourir cette même distance. Le rayon du haut va plus vite que celui du bas et arrive donc avant, même s'il ne faut pas oublier que la différence de durée de propagation est infinitésimale. Cela s'explique par le fait que la vitesse change selon le milieu de propagation : dans l'air, la valeur est d'environ 300.000.000 m/s alors que dans l'eau, la valeur est plus petite, d'environ 225.000.000 m/s. Une limite du modèle réside dans le fait que la vitesse de la lumière n'est pas rendue compte.

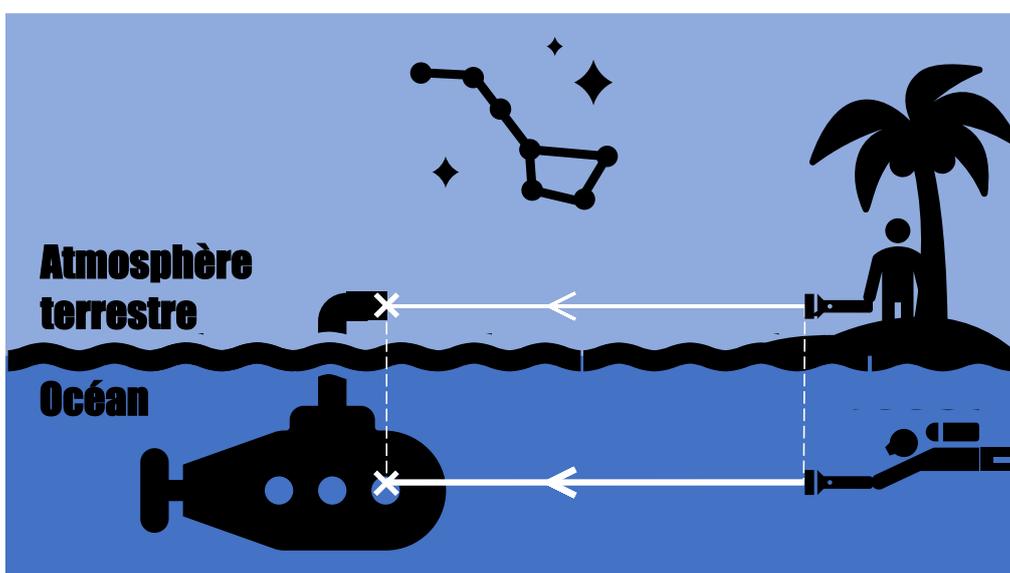


Figure 1. Les deux rayons arrivent-ils sur leur croix au même moment ?

Un modèle pouvant évoluer et se perfectionner, il est ainsi question de penser le modèle de la lumière dans le but de représenter le rayon lumineux en y intégrant la vitesse et, de cette manière, de prendre en considération le milieu de propagation. Cette question est, à plus forte raison, d'intérêt puisque comme il sera vu plus loin, les élèves présentent des conceptions et des difficultés à l'entrée du cycle 4 (5^e), comme le fait de croire que la lumière possède une vitesse dont la valeur est infinie.

II) Annonce du plan

La partie **III) État de l'art** couvre une revue des éléments théoriques sur la lumière (sa nature, sa modélisation en optique, sa vitesse, la dépendance de cette vitesse en fonction du milieu) et des conceptions des élèves associées au concept de lumière.

La partie **IV) Problématique et méthodologie** synthétise la question de recherche et énonce la problématique. La manière de répondre à ce questionnement scientifique par des observables vérifiables et testables (comparaison de manuels scolaires, réalisations didactiques en classe) est explicitée.

En premier lieu, dans le **V) Étude comparative de l'enseignement de la lumière et de la célérité de la lumière**, quatre manuels sont confrontés à l'aide d'une grille critériée ; critères définis au regard des conceptions dégagées de la bibliographie. L'enseignement du modèle de la lumière et de la vitesse de la lumière est investigué afin de dégager les ressemblances et les différences qui subsistent dans le corpus.

En deuxième lieu, **VI) Situation expérimentale**, des questionnaires sont remplis par des élèves, avant et après la séquence d'enseignement, puis analysés. La *plus-value* de ces questionnaires repose sur l'acquisition de données chiffrées de certaines conceptions (caractère fini ou non fini de la vitesse de la lumière, influence de la source de lumière dans la valeur de la vitesse). Deux activités sont présentées et justifiées par les résultats des questionnaires avant séquence : l'une sur le caractère fini de la lumière, l'autre sur l'introduction d'un modèle original appelé le « modèle enrichi de la lumière », qui tient compte du milieu de propagation en intégrant la vitesse dans le modèle. Là encore, la valeur ajoutée de cette partie repose sur cette activité qui aide à concrétiser le fait que la valeur de la vitesse de la lumière est en état de changer de valeur selon le milieu.

Enfin, la partie **VII) Conclusion et réponse à la problématique** récapitule les principales observations, suivie par la partie **VIII) Perspectives proposées**. Les parties **IX) Références bibliographiques** et **X) ANNEXES** (au nombre de 19) clôturent le tout.

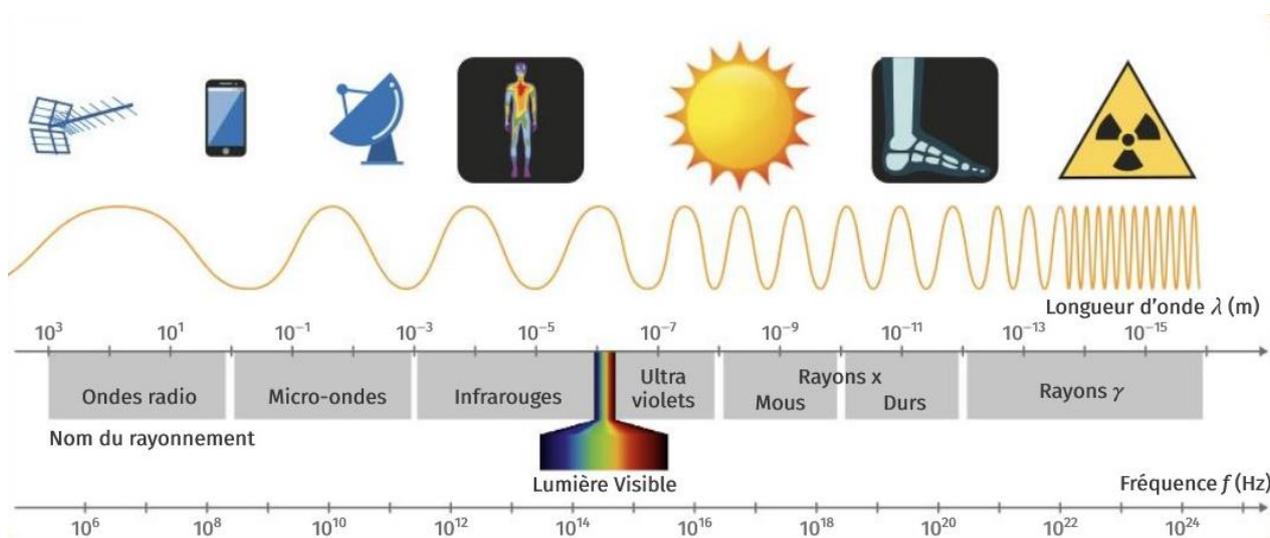
III) État de l'art

Avant de s'intéresser aux difficultés des élèves de cycle 4 (5^e, 4^e, 3^e) concernant le concept de lumière et sa modélisation, tout en examinant la place de la vitesse dans ce modèle, les aspects scientifiques du modèle de la lumière et de la vitesse de la lumière qui sont en jeu au niveau collège, lycée ou *post-bac*, sont rappelés.

III) 1. Le modèle de propagation de la lumière : éléments de contenu et construction historique

III) 1. i. Nature de la lumière

Définir la lumière n'est pas une tâche facile. La lumière visible par l'œil humain représente la partie visible du rayonnement électromagnétique dont le spectre s'étend des rayons gamma aux ondes radio selon l'énergie E transportée. Les différents domaines du spectre de la lumière sont identifiés sur la **Figure 2**.



Au collège (éduscol, 2020), en s'appuyant sur l'optique géométrique, la lumière est vue comme la propagation de l'énergie lumineuse ou bien du signal lumineux, dans les milieux

transparents. Au lycée, en classe de seconde (éduscol, 2019b), la lumière est définie comme une onde. En classe de première (enseignement de spécialité de la voie générale) (éduscol, 2019a), la lumière est, en plus, définie comme un paquet de photons, c'est-à-dire comme la propagation de particules de masse et de charge électrique nulles possédant une énergie quantifiée *i.e.* proportionnelle à un minimum d'énergie. Ce dualisme de la définition de la lumière s'appelle la dualité onde-corpuscule. Certaines observations peuvent être expliquées en utilisant l'optique géométrique ou bien l'un de ces deux modèles :

- Avec l'optique géométrique : formation des images et des mirages, phénomènes de réflexion.
- Avec le modèle ondulatoire de la lumière (optique ondulatoire, électromagnétisme) : phénomènes de réflexion également, de réfraction, de dispersion, de diffraction, mais aussi d'évanescence, d'interférences, et de polarisation.
- Avec le modèle corpusculaire de la lumière (physique quantique) : interactions (onde – particule, onde – matière et particule – matière, ainsi que leurs diffusions associées), effet photoélectrique, catastrophe ultraviolette.

La nature de la lumière n'est donc pas unique, ce qui est à l'origine de nombreux débats à travers l'histoire. Au XVIII^e siècle, les expériences de l'anglais Isaac Newton avec un prisme sur la décomposition de la lumière « blanche » en différentes lumières colorées soutient à la fois le modèle corpusculaire de la lumière que Newton défendait dans son traité *Opticks* (Newton, 1704) (couleur et énergie) ainsi que, comme cela sera compris plus tard, le modèle ondulatoire de la lumière (dispersion et réfraction). Pourtant, à la même époque, le néerlandais Christian Huygens s'oppose à cette idée. Il travaille sur les propriétés optiques du spath d'Islande dans lequel la lumière se propage de façon anisotrope de telle sorte que la lumière semble se diviser en deux. Ce phénomène – la biréfringence ou double réfraction – ne peut s'interpréter qu'avec une théorie ondulatoire de la lumière. En 1801, l'expérience des fentes de Young, du nom de son inventeur anglais Thomas Yong, consiste à faire interagir deux faisceaux de lumière qui sont en cohérence temporelle et en cohérence spatiale. Là aussi, seule une théorie ondulatoire permet d'en interpréter les observations. Par le concours de Maxwell, il est montré que la lumière est la superposition d'un champ électrique et d'un champ magnétique : la lumière est une onde électromagnétique. Toutefois, durant l'*annus mirabilis* de 1905, Albert Einstein publie un article sur l'effet photoélectrique (Einstein, 1905b) *i.e.* l'émission d'un électron sous l'effet de la lumière, qui lui vaudra le prix Nobel de Physique en 1921. Cette fois-ci, c'est la théorie corpusculaire qui semble être la seule à pouvoir expliquer le phénomène : l'absorption de paquets d'énergie (les *quanta*) est responsable de l'éjection des électrons du matériau irradié. L'expérience de la goutte d'huile de Millikan en 1915 fournira une confirmation expérimentale de ce

comportement semblable à un flux de particules ; le scientifique américain recevra alors le prix Nobel de Physique en 1923.

L'ensemble de ces débats suscitent le fait que certains phénomènes s'expliquent avec un modèle tandis que d'autres phénomènes s'expliquent avec un autre modèle. Dans les années '60, le physicien américain Richard Feynman formalise le caractère dual de la lumière par une expérience de pensée sur les fentes de Young. En envoyant, non pas de la lumière, mais des électrons (à l'aide d'un canon à électron qui envoie une par une les particules) sur les deux fentes, chacun provoque une tache lumineuse sur l'écran. Mais au lieu d'obtenir deux tâches allongées (dessinant la forme des deux fentes), une figure d'interférence se forme, où chaque photon semble être passé simultanément par les deux fentes. Le mathématicien et physicien français Louis de Broglie généralise, quant à lui, le caractère dual de la lumière par une hypothèse de la mécanique quantique selon laquelle toute matière est dotée d'une onde associée : les natures ondulatoire (représentée par la longueur d'onde λ) et corpusculaire (représentée par la quantité de mouvement p) sont reliées grâce à la constante de Planck h par l'équation : $\lambda = h/p$ (de Broglie, 1924). L'hypothèse de De Broglie fait la synthèse de la nature complexe de la lumière. L'expérience de Davisson-Germer en 1927 fournira une confirmation expérimentale du comportement ondulatoire des électrons du fait de la découverte de la diffraction des électrons par les cristaux de nickel ; les deux scientifiques américain et britannique recevront le prix Nobel de Physique en 1937. Les deux modèles de la lumière ne sont donc pas opposés, ils sont complémentaires et révélateurs de sa nature quantique. Il ne s'agit pas de choisir entre onde et corpuscule, mais de tenir compte des deux ; c'est le principe de complémentarité, formulé par le danois Niels Bohr en 1927, sachant que la nature réelle de la lumière reste inaccessible et mixte.

III) 1. ii. Modèle du rayon lumineux (définition en optique géométrique)

La notion de rayon de lumière est apparue dès l'Antiquité, mais ce sont les travaux du scientifique arabe Alhazen, de son vrai nom Ibn al-Haytham, au X^e – XI^e siècle après Jésus-Christ, qui permirent d'en identifier les propriétés telle que la propagation rectiligne (Franchot et al., 2017d). Un rayon lumineux est un modèle : une trajectoire orientée (direction, sens) effectivement empruntée par la lumière. À ne pas confondre avec un faisceau lumineux qui, lui, est un ensemble de rayons lumineux en provenance d'une seule et même source ponctuelle (un continuum de sources ponctuelles est appelé source étendue). La source en question peut être aussi bien primaire (qui envoie de l'énergie lumineuse, *e.g.* le Soleil) que secondaire (dénommée objet diffusant au collège, qui renvoie de l'énergie lumineuse, *e.g.* la Lune).

La lumière emprunte, généralement, un chemin rectiligne car cela minimise la distance (et la durée) de son parcours (ou chemin optique) entre deux points, selon le principe de Fermat. Les exceptions concernent, à titre d'exemples, les mirages dans les déserts (réfraction dépendante de la température) ainsi que les lentilles gravitationnelles en astrophysique (théorie de la relativité générale, (Einstein, 1915, 1916)). Par conséquent, le modèle du rayon lumineux est symbolisé par une portion de droite munie d'un sens (ou un segment fléché) : .

III) 1. iii. Vitesse (finie) ou célérité de la lumière ?

La lumière se propage à une vitesse v qui n'est pas infinie. Elle n'a pas besoin de milieu matériel pour se propager (ce à quoi l'éther, introduit par Aristote dans l'Antiquité mais aujourd'hui obsolète, tentait de remédier). Dans le vide, la valeur de la vitesse de la lumière est la suivante : 299.792.458 m/s arrondie à 300.000.000 m.s⁻¹ ($\sim 3,00 \times 10^8$ m.s⁻¹). Cette valeur est constante quel que soit le référentiel choisi. Autrement dit, peu importe le corps de référence par rapport auquel le mouvement du système physique est étudié (un observateur immobile ou bien mobile), cette valeur reste la même ; le théorème de composition des vitesses n'est donc pas applicable. Cette invariance est notamment à l'origine de la théorie de la relativité restreinte élaborée par Albert Einstein en 1905 (Einstein, 1905c).

La vitesse de la lumière dans le vide est dénommée « célérité », notée c , pour plusieurs raisons. D'abord, la lumière est considérée comme une onde, or le terme de « vitesse » renvoie plus à un déplacement matériel qu'à la transmission d'une énergie ou d'une information. Puis, comme la lumière possède une vitesse invariante (dans le vide), sa vitesse devient une constante physique qui intervient dans plusieurs relations physiques (formule d'équivalence entre la masse m et l'énergie E (Einstein, 1905a) : $E = m \cdot c^2$) ainsi qu'en physique relativiste. Enfin, la valeur de la vitesse de la lumière change selon le milieu de propagation ($v \neq c$ si le milieu est différent du vide) : près de 300.000.000 m.s⁻¹ dans l'air (quasiment analogue au vide), proche de 225.000.000 m.s⁻¹ dans l'eau.

Aujourd'hui considéré comme acquis, le fait que la vitesse de la lumière ait une valeur finie, de surcroît avec une précision remarquable, émane de plusieurs travaux scientifiques. Une perspective historique est résumée ci-après, s'appuyant sur des éléments historiques issus d'une recherche dans des manuels mais pas seulement. Les manuels scolaires de Physique-Chimie de cycle 4 sont notamment : (Azan & Collectif, 2017d) édité par Nathan, (Franchot et al., 2017d) édité par Le Livre Scolaire (orthographié Lelivrescolaire.fr), (Ruffenach et al., 2017d) édité par Bordas. Les manuels

scolaires de Physique-Chimie de lycée sont notamment : (Lionel et al., 2019) édité par Lelivrescolaire.fr pour des 1^{ères} de spécialité. Hors manuels : (Bonnet, 2003), (CERIMES (Centre de Ressources et d'Informations sur le Multimédia pour l'Enseignement Supérieur), 2006). L'*annexe X* I exhibe les visages des scientifiques cités.

Pensant que la lumière se « propage » de manière instantanée, il faudra attendre les X^e – XI^e siècles pour qu'Alhazen puisse envisager, pour la première fois, l'idée que la lumière se propagerait à une vitesse finie. Ce n'est pourtant qu'au début du XVII^e siècle, plus d'un demi-millénaire plus tard, que les premières mesures pour confirmer ou infirmer cette supposition arrivèrent, avec l'italien *Galileo Galilei*. Galilée plaça deux personnes distantes de quelques kilomètres entre deux collines et munies d'horloges pour mesurer un temps de propagation, mais à cause des moyens de l'époque, il ne put obtenir des mesures concluantes. Il fallait, en effet, mesurer des durées de l'ordre de 10^{-5} s. C'est le danois Ole Christensen Rømer qui viendra donner raison à l'hypothèse du caractère fini de la lumière en résolvant le problème d'observation auquel faisait face l'astronome *Giovanni Domenico Cassini* (Jean-Dominique Cassini), dit Cassini I^{er}. En 1671, alors que ce scientifique italien essaye de déterminer les jours et horaires des éclipses de Io (une lune de la planète Jupiter), il rencontre plusieurs fois des erreurs dans ses prévisions : le mouvement de Io derrière Jupiter n'est pas toujours prédictible. Rømer, en 1676, oriente son télescope vers Io à deux dates différentes de l'année (la distance entre la Terre et Io varie entre ces deux dates), et remarque que le temps de parcours de la lumière varie également (si la distance augmente, le temps que la lumière réfléchi par Io atteigne la Terre augmente également). La position de Io est correctement prédite, à condition de prendre en compte un temps de trajet de la lumière, appuyant ainsi l'existence d'une vitesse finie. Une première estimation est même avancée (214.300 km/s) par Rømer, mais il se garde d'affirmer cette valeur car il ne connaissait pas les distances exactes qui séparaient la Terre de Io et de Jupiter. Le britannique James Bradley se distingue alors, en confirmant les résultats de Rømer et en proposant une estimation plus précise de la valeur de la vitesse de la lumière grâce à la distance Terre-Soleil, à 300.000 km/s. Il ajoute un détail : le temps que met la lumière du Soleil pour arriver sur la Terre, en 8 minutes et 12 secondes (aujourd'hui, la valeur connue est de 8 minutes et 20 secondes). En 1849, le français Hippolyte Fizeau parvient à en mesurer une valeur légèrement différente, en mettant au point une expérience innovante pour mesurer le temps de vol. Il fait réfléchir de la lumière entre Suresnes et Montmartre (dans la région d'Île-de-France) en direction d'une roue dentée rotative avant d'atteindre un miroir pour ensuite être réfléchi à nouveau et arriver à l'œil de l'observateur. En faisant varier la vitesse de cette roue jusqu'à ne plus être capable d'occulter périodiquement la lumière réfléchi sur le miroir, Fizeau parvient à remonter à la vitesse de la lumière, estimée à environ 315.300 km/s dans l'air, grâce aux paramètres de la roue. À partir de là, des mesures plus précises seront réalisées pour affiner de plus en plus la valeur. Le français Alfred Cornu perfectionne le dispositif de Fizeau et

estime la valeur aux alentours de 300.400 km/s. En 1850, un dispositif de miroirs, dont un tournant à une vitesse de près de 300 tours/s, est inventé par le français Léon Foucault pour mesurer la vitesse de la lumière, cette fois-ci dans un milieu autre que l'air (l'eau) pour comparaison : il trouve des valeurs proches de 298.000 km/s (dans l'air) et 225.400 km/s (dans l'eau). En 1878, par ce qui est connu aujourd'hui comme l'interféromètre de Michelson et Morley, le prussien Albert Michelson et l'américain Edward Morley accomplissent une mesure de la vitesse précise à 50 km/h près. La même année, de son côté, l'américain Simon Newcomb entreprend des mesures avec la méthode de Foucault. Henri Perrotin tente de ramener la France au record de précision, entre 1898 et 1904 à l'Observatoire de Nice, avec l'appareillage de Cornu.

Finalement, la valeur de la vitesse de la lumière peut s'obtenir en s'appuyant sur les équations formulées par le britannique James Clerk Maxwell (Maxwell, 1865) avant d'être simplifiées par le britannique Oliver Heaviside en adoptant le calcul vectoriel. Les équations des ondes, ou équations de d'Alembert, peuvent être retrouvées à partir des équations posées par Maxwell sous leur forme actuelle.

La précision de la valeur de la vitesse de la lumière est cruciale, et deux situations peuvent l'attester. La première, car elle sert à définir le mètre (m) pour mesurer la distance (d ou Δd) dans le Système International (SI). La deuxième, car elle sert à calculer des distances d'ordre astronomique, comme c'est le cas lors du calcul de la distance qui sépare la Terre de son satellite naturel. L'*annexe X) 2* clarifie et détaille tout ceci.

III) 1. iv. Vitesse de la lumière fonction du milieu de propagation

Selon la relativité restreinte, rien ne peut aller plus vite que la lumière, sa vitesse a une valeur fixe et universelle, indépendante de l'observateur. En effet, les vitesses supérieures à $c = 299.792.458$ m/s ne sont qu'hypothétiques (cas des neutrinos comme il fut pensé un certain temps, ou encore d'observations de certains objets astronomiques laissant un mouvement superluminaire apparent mais qui se sont révélées être une illusion d'optique (Artru et al., 2012)).

En revanche, le milieu matériel dans lequel se propage la lumière influe sur la valeur de la vitesse : outre la longueur d'onde du rayonnement considéré, la température, la pression, la densité, ou encore la nature chimique et la concentration pour les solutions en chimie. Ce faisant, dans les milieux et matériaux transparents, la lumière se propage à une vitesse v plus petite que c . Pour calculer v , il suffit d'utiliser la relation $n = c/v$, avec n l'indice de réfraction qui traduit les

interactions des photons de la lumière avec les atomes du milieu ($n > 1$ lorsque le milieu n'est pas le vide). Quelques valeurs : $n(\text{vide}) = 1$, $n(\text{air}) \approx 1$, $n(\text{eau}) \approx 1,33$, $n(\text{Plexiglass®}) \approx 1,49$, $n(\text{verre typique}) \approx 1,52\dots$ Cela permet d'expliquer l'expérience de décomposition de la lumière par Newton qui fut possible au XVIII^e siècle. Effectivement, le prisme est un objet dispersif, en d'autres termes, un milieu dans lequel les différentes longueurs d'onde λ constituant une onde polychromatique ne se propagent pas à la même vitesse v car l'indice de réfraction n dépend de λ . Pour chaque fréquence, les rayons sont donc réfractés de manière différente, à savoir déviés différemment car chaque rayon ne se propage pas à la même vitesse, d'où la séparation des couleurs de la lumière conduisant à l'obtention du spectre de la lumière.

n est un paramètre physique important qui intervient dans les mécanismes de la vision, plus particulièrement en ce qui concerne la formation des images (image formée après passage dans un système optique ou à travers une lentille). En effet, sur une surface réfléchissante (un miroir) ou semi-réfléchissante (un miroir sans tin si transmission sans déviation, un dioptré si transmission avec déviation), les lois de Snell-Descartes (XVII^e siècle) décrivent le comportement de la lumière à l'interface entre deux milieux optiques d'indices n_1 et n_2 différents, étant transparents, homogènes, isotropes et non dispersifs.

III) 2. Conceptions des élèves sur la lumière

III) 2. i. Apport de l'histoire dans l'enseignement (cas de la vision et de la vitesse)

L'article (de Hosson & Kaminski, 2007) veut intégrer l'histoire des sciences – les conceptions rencontrées dans le passé et les connaissances actuelles – au concept de la lumière et de la vision. Cette intégration permet d'évaluer l'impact cognitif de la compréhension des mécanismes optiques par rapport à différentes époques. Les auteurs présentent un outil qui consiste en un dialogue entre trois personnages qui argumentent un fait à propos de la lumière et de ses mécanismes (par exemple : le sens de la lumière dans la vision ou encore la « quantité » de lumière responsable de l'éblouissement), où un personnage donne la bonne réponse associée à un fait, un autre donne une mauvaise réponse par rapport à ce qui était pensé à une certaine époque, un troisième personnage hésite. À partir de ce dialogue, les élèves discutent et débattent entre eux pour savoir qui a raison et pourquoi. Il est montré l'intérêt de l'approche didactique historique. Une des conclusions est que les élèves s'identifient aux personnages qui se trompaient par le passé et qui soutenaient les mêmes inexactitudes. Cela rend l'erreur – plutôt la conception erronée – moins alarmante car d'autres, avant,

commettaient la même. Comme les conceptions des élèves se retrouvent dans l'histoire, l'erreur de l'élève est dédramatisée. Il est également conclu que les élèves sont davantage impliqués dans leur propre apprentissage quand ceux-ci remettent en question leur première idée pour en développer une nouvelle, cette fois-ci juste.

Les articles de (Maurines & Mayrargue, 2005) et de (Maurines & Beaufils, 2011), le premier présentant une séquence sur la lumière et le deuxième la démarche didactique (document professeur, documents élèves, type d'activités), explorent davantage la question de la place de l'Histoire dans l'enseignement. D'après (Maurines & Beaufils, 2011), il s'agit de lutter contre l'image simplificatrice et exagérée du savant unique ayant eu une idée géniale et venue d'elle-même, alors qu'au contraire, elle est venue après un processus long, sujet aux théories et aux expérimentations. Cette nouvelle pensée est enseignée par la distribution d'une interaction complexe et étendue dans le temps entre les savants, sous la forme d'un diagramme à compléter. De même, il s'agit de montrer les interrelations entre des avancées techniques et l'évolution des idées et des connaissances.

Les élèves peuvent présenter des difficultés liées à la compréhension de la vitesse de la lumière (vitesse infinie ou finie) ; certains élèves pensent que la lumière se propage de manière instantanée, mais ce constat est souvent implicite, peu quantifié (énoncé dans (Maurines & Mayrargue, 2005)), alors qu'il pourrait être une cause de conception fautive. Dans leur article, (Maurines & Mayrargue, 2005) revendiquent les bénéfices de l'approche historique pour motiver les élèves dans l'enseignement en France, soit sous la forme de questions en lien avec un texte historique, soit sous la forme de prédictions à déduire d'un texte avant une confrontation expérimentale qui suit. La raison est, comme abordé précédemment, qu'il peut exister des similitudes entre les conceptions des étudiants et les anciennes théories. L'histoire relative à la vitesse de la lumière et son enseignement prend ainsi son sens afin de mieux comprendre l'existence des difficultés sur ce sujet et pourquoi certains peuvent la considérer comme infinie alors qu'elle ne l'est pas.

III) 2. ii. Conceptions sur la nature de la lumière

Dans l'enseignement secondaire (collège, lycée), une définition de la lumière en tant qu'onde ou en tant que corpuscule n'est donnée qu'à partir du lycée, tandis qu'au collège, la lumière est définie à ce stade comme le transport d'une énergie (ou d'un signal), or le terme « énergie » n'est, lui-même, pas trivial. Il n'est donc pas étonnant, au collège (6^e, 5^e, 4^e, 3^e) et encore plus en primaire (CP, CE1, CE2, CM1, CM2), que les élèves ne sachent pas exactement ce qu'est la lumière. À la lecture de

(Delacôte et al., 1978), les élèves français (en CM2 et en 4^e pour une minorité) ne parviennent pas à différencier la lumière de sa source et de ses effets, faisant par ailleurs remarquer que ce n'est peut-être pas un hasard car le langage courant emploie le terme de « lumière » sans en véhiculer le sens physique. C'est le cas lorsqu'il est dit de se mettre « près de la lumière » ou encore d'« allumer la lumière ». La lumière n'est pas identifiée en tant que telle, elle est soit une source, soit un effet, soit un état, mais n'a pas d'existence qui lui est propre. Il faudra attendre le cycle 4 pour cela, à 12 ans à peu près. (Guesne, 1985) a poursuivi cette thématique. En évaluant des enfants et des adolescents français de 10 à 15 ans, ces derniers trouvent que la lumière peut être assimilée à sa source ou à ses effets, puis, la lumière est une entité qui peut être localisée dans l'espace. Une analyse marquante du premier point est le fait que, pour les élèves, la lumière n'existe pas tant qu'elle n'est pas assez intense pour être perceptible, c'est le cas de l'éblouissement. La majorité des élèves interrogés par (de Hosson, 2004) font porter le même constat. L'idée essentielle de ce paragraphe est donc que, pour la lumière, nature et effets ne sont pas distingués, et ce même pour des élèves plus âgés.

À la lecture de (Guesne, 1985) cette fois-ci, la même observation peut être attestée sur les couleurs. Quand l'auteur demande à une élève de 14 ans ce que c'est que la lumière, elle distingue la « lumière électrique » de la « lumière » seule : *“There's sunlight that brings us daylight... and then there's the light which is made, electric light to illuminate us...”*. L'auteur, poursuivant la conversation, demande si ce n'est pas la même chose, ce à quoi l'enfant répond : *“No, because there's sunlight, and then there's lights like that”*, introduisant la « lumière solaire », soit une nouvelle distinction. Reprenant la question de la nature de la lumière, (Haagen-Schützenhöfer, 2017) s'intéresse aux conceptions associées à la lumière blanche et aux couleurs sur des élèves âgés entre 12 et 14 ans appartenant à deux groupes différents : un groupe avec introduction à l'optique, un autre groupe sans. L'auteur montre que les termes de tous les jours comme *“daylight”* (= lumière du jour), *“sunlight”* (= lumière du Soleil) dans le langage courant, ou encore *“whitelight”* (= lumière blanche) dans le langage scientifique, n'activent pas les mêmes cognitions. Les résultats de l'étude montrent, à titre d'exemple, que pour la moitié des deux groupes interrogés, « *sunlight* » renvoie plus vers une lumière jaune que *“daylight”*, peu importe le niveau d'instruction. Pour la couleur du terme *“light”*, les réponses prédominantes sont « blanche », « mix de couleurs spectrales » et « jaunâtre » pour le groupe dit instruit, « blanche + jaune », « incolore » et « jaunâtre » pour le groupe dit non-instruit. Il est intéressant de dire que (Haagen-Schützenhöfer, 2017) propose de parler de *“similar to daylight”* (= similaire à la lumière du jour) plutôt que de *“whitelight”*.

Sur les notions de chaleur et de lumière, (Delacôte et al., 1978) questionnent les conceptions d'élèves de 11 ans en classes de CM2 ainsi que d'élèves de 14 ans en classes de 4^e via des entretiens

individuels de deux sortes : directifs et non directifs. Certaines conclusions signalent, d'abord, le fait qu'une partie des enfants (qu'ils soient en CM2 ou en 4^e) assimilent, improprement, la lumière à de la matière. Même si la majorité des élèves de 4^e accordent une entité à la lumière, située dans l'espace et dans le temps, cette entité reste mal comprise, de même pour ses propriétés dont certaines sont admises (mouvement dans l'espace, trajet rectiligne), d'autres moins (conservation de l'énergie). (Delacôte et al., 1978) constatent ainsi que certains élèves pensent que la lumière peut s'estomper (ou se renforcer) avec la distance. Un des élèves (13 ans, 4^e) répond : « *à un moment elle s'arrête parce que c'est trop loin... À un moment elle peut plus... on la voit plus... Je crois qu'elle ne peut plus traverser l'air ; elle a perdu sa... sa densité* ». (Guesne, 1985) constate la même chose : sans interaction avec la matière, la lumière peut disparaître, ou au contraire, s'intensifier lorsqu'elle passe à travers une loupe. (Maurines & Mayrargue, 2005) identifient également le même souci mais en Licence : 55 à 68 % des étudiants répondent « Oui » au fait que la vitesse de propagation d'une onde (mécanique, donc pas forcément la lumière même si l'analogie peut être faite) le long d'une corde peut diminuer au cours du temps.

Le dernier point à aborder concerne ce à quoi peut renvoyer le mot « lumière » à l'école. Dans le dictionnaire des éditions Larousse, en ligne (Larousse, s. d.), les définitions de « lumière » et de « lumières » sont, en tout, au nombre de 15 (*annexe X* 3). Le mot, développé par rapport aux sciences de la nature (sciences empiriques, sciences fondamentales) et de la physique, peut pourtant renvoyer à d'autres disciplines comme la philosophie. Le siècle des Lumières *désigne un mouvement européen du XVIII^e siècle qui plaçait les connaissances intellectuelles et scientifiques au-dessus des croyances et superstitions imposées par le Clergé* (définition du dictionnaire de Linternaute (*Siècle des lumières*, s. d.)). C'est pourquoi, il est nécessaire d'être conscient des différents cadres d'étude existant sur l'enseignement de la lumière pour se préserver d'éventuelles confusions.

III) 2. iii. Conceptions sur la vision

De nombreuses recherches se sont intéressées aux conceptions des élèves sur la vision (optique géométrique). Au cycle 3 et même au cycle 4, les élèves peuvent manifester le fait que « quelque-chose », qui n'est pas forcément de la lumière, parte de l'œil vers l'objet et non l'inverse. L'œil est donc vu comme un objet actif ((de Hosson, 2004)) et non comme un « capteur » de lumière au niveau de la rétine. Une grande majorité des élèves explique la vision par un raisonnement spontané, non scientifique, selon une mécanique œil → objet (rayon lumineux partant de l'œil et arrivant sur la fleur) et non objet → œil (de Hosson & Kaminski, 2006, 2007).

Enseignant à une classe d'élèves de 8-9 ans (*year 8*), (Fetherstonhaugh, 1990) montre l'influence de son cours sur la diminution des conceptions liées à la lumière. Les conceptions relevées sont résumées ainsi : la lumière voyagerait sur des distances différentes en fonction de si c'est le jour ou la nuit, la lumière ne se propagerait pas le jour pour certains ou pas la nuit pour d'autres, la vision fonctionnerait parce qu'une personne regarde et non parce que la lumière est réfléchiée par des objets (même conception relevée par (de Hosson, 2004; de Hosson & Kaminski, 2006, 2007)), certaines personnes ne pourraient voir uniquement dans le noir, les chats pourraient voir la nuit, la lumière resterait sur le miroir, les images pourraient être à deux endroits, les lentilles ne formeraient pas nécessairement des images tandis qu'une lentille formerait nécessairement une image.

Comme le note (Kaminski, 1989), « malgré l'apparente simplicité [du modèle des rayons lumineux], des difficultés surgissent à son propos ». Quelques exemples viennent appuyer ce constat dans l'article cité, dans lequel trois groupes de professeur de collège ont participé à une enquête, résumée dans la **Figure 3** ((a), (b) et (c)).

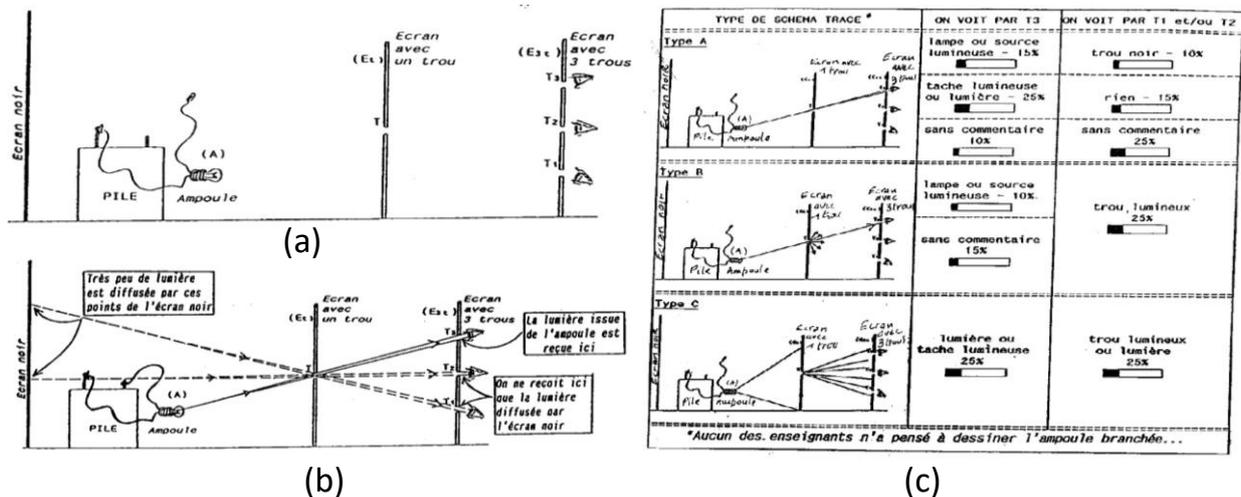


Figure 3. (a) Schéma du montage proposé aux enseignants dans (Kaminski, 1989), où il leur est demandé ce que les yeux devant chaque trou voient. (b) Prévission correcte de l'exercice. (c) Schémas et précisions répondus par les enseignants soumis à l'exercice en question (Kaminski, 1989).

Dans les réponses de type A, la moitié des enseignants dessine les bons tracés lumineux de la lampe vers T3. Dans les réponses de type B et C, l'autre moitié donne également la réponse T3, mais avec des traits de construction représentant des phénomènes physiques qui ne se produisent pas réellement. La démonstration du trajet de la lumière avec un « rayon laser », d'après (Kaminski, 1989), participe à ce genre de conception. La lumière d'un dispositif de *Light Amplification by*

Stimulated Emission of Radiation peut devenir « visible » en y éparpillant des obstacles suffisamment petits pour ne pas obstruer tout le diamètre de la lumière laser, comme avec une bombe à eau pulvérisante. Cela permet de voir la lumière du rayon, mais uniquement parce que les gouttes d'eau diffusent la lumière dans toutes les directions, et pas seulement dans la direction unique du laser. En fin de compte, les recherches de (Kaminski, 1989) proposent d'autres exemples de schématisation des rayons lumineux présentés aux professeurs, tous précisant que les difficultés d'acquisition des notions de base de l'optique géométrique sont généralement très sous-estimées, qu'elles apparaissent chez des personnes de niveaux de formation divers, et suggérant qu'elles ont été au mieux non traitées, au pire renforcées par l'enseignement. Pareillement, des conceptions sur la lumière sont retrouvées chez des professeurs-étudiants (*pre-teacher* ou *student teacher*), ce qui est pointé du doigt par (Wahyuni et al., 2019). Un dernier exemple de (Kaminski, 1989) vient rendre plus légitime de telles conclusions, à propos de la formation des images. (Kaminski, 1989) met en évidence que les étudiants font comme si les rayons issus de la source sont seulement des rayons de construction et que les lentilles focalisent seulement ces rayons. Il peut être noté qu'un document du site éducol, intitulé « Les conceptions initiales sur la formation des images », a été publié (éducol, 2019c).

(Guesne, 1985) a, elle aussi, apporté une large contribution aux conceptions de la vision, dont (Kaminski, 1989) et (de Hosson & Kaminski, 2007), pour ne citer qu'eux, s'inspirent. Elle introduit le terme de *sunbath* (= bain de Soleil), repris dans (de Hosson, 2004) en tant que « bain de lumière ». Le phénomène de vision des objets liés à la réflexion de la lumière sur ceux-ci ne convainc pas certains enfants qui penseraient que l'espace serait rempli de lumière (sorte d'analogie fluide, non stipulée par « bain de lumière », même si cela renvoie à un aspect matériel). La lumière ne proviendrait pas forcément des objets qui entourent un milieu, et même la lumière n'aurait pas besoin de source pour être visible.

III) 2. iv. Conceptions sur la vitesse

Les auteurs (Maurines & Mayrargue, 2005) considèrent qu'il manque des données de recherche sur les conceptions des élèves relatives au concept de vitesse de la lumière, ce qui concourt à justifier la recherche engagée par ce mémoire :

The unit [for the grade 10 (aged 15-16)] examines two other points, which are in the program and which we suppose to be difficult for students: the fact that light has a finite velocity and the fact that white light may be considered as composed of several "coloured lights". Indeed, we have not found many informations on the difficulties encountered by students on these particular subjects.

De précédents travaux (*cf.* (Maurines, 1992) avec des étudiants universitaires préparant une Licence) ont démontré que la propagation d'une onde mécanique pouvait être comparée au mouvement d'un objet mécanique (analogie mécanique). Lors de la propagation d'une onde d'une extrémité d'une corde à une autre, le milieu est vu comme un support passif tandis que la « bosse » un objet matériel créé et mis en mouvement par la source, dont la vitesse dépend et qui peut même diminuer au cours du temps. Or, même si un signal peut s'estomper, la vitesse est bien conditionnée par le milieu et non par la source. La notion de force est plusieurs fois mentionnée par les étudiants pour expliquer l'idée conceptuelle que la vitesse dépendrait de la source. La **Figure 4** atteste de ce genre de résultats. Pour certains, si l'intensité de cette force augmente, le signal se propagera de manière plus rapide le long de la corde, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Sur le signal sonore (*cf.* (Maurines, 1993) avec des lycéens), les conclusions sont quasiment identiques.

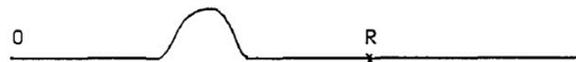
Appendix 1. The propagation velocity depends on the initial conditions

Question:

A red mark is tied to the rope on point R. A child holds the end O in its hand.



The child moves its hand and observes the following shape at the instant t .



Question: Is there a way of moving the hand so that the shape reaches the red mark earlier than in the first experiment?

YES NO
If yes, which one?
If no, why?

Results:

	Correct answer No ($V=$)	Wrong answer Yes ($V\neq$)
W0 (N=42)	36%	60% (F.j*: 84%**)
W1 (N=16)	25%	75% (F.j: 67%)

* F.j: justifications that mention force.

** Percentage calculated on the number of students who answer ' $V\neq$ '.

Examples of justifications to ' $V\neq$ '

The speed depends on the *force given by the hand* (emphasis added by author).
The bump will move faster if the *shake* is sharp.

Figure 4. La vitesse de propagation d'une onde qui dépendrait des conditions initiales est un des résultats mis en annexe (1 sur 8) du papier de (Maurines, 1992).

Dans l'article de (Maurines & Mayrargue, 2005), il est fait l'hypothèse que les élèves de 15-16 ans (2nde, 1ère) pourraient appliquer le même raisonnement pour le signal lumineux et donc

considérer la lumière comme un objet matériel (comme cela a été discuté par (Delacôte et al., 1978)), ce qui a un impact sur la manière d’appréhender la vitesse de celle-ci. Effectivement, bien que les élèves attribuent une vitesse à la lumière dès lors qu’elle se « propage », cela signifierait que les élèves ne considèreraient pas la vitesse de la lumière comme constante, caractéristique du milieu de propagation, mais comme pouvant dépendre des conditions initiales du mouvement. Le sens physique de la vitesse ne serait donc pas entièrement compris.

Cette analogie avec la mécanique a également été mise en évidence dans une autre étude. La localisation de la lumière dans l’espace et la notion de temps de propagation sont des indicateurs de reconnaissance de l’entité « lumière » pour (Delacôte et al., 1978). Ces auteurs indiquent dans leur article que seuls quelques élèves français font appel à une dimension temporelle pour décrire la lumière. Lorsque c’est le cas, les élèves interrogés expriment la notion de temps de propagation pour de longues distances (exemple : rayons du Soleil arrivant sur la Terre) mais peinent à exprimer le même constat pour de petites distances (exemple : rayons d’une lampe) ; un constat déjà signalé par (Guesne, 1985). Un élève de 13 ans en 4^e indique dans un témoignage : « *Si le soleil s'éteignait... on aurait encore de la lumière pour longtemps. Parce que le soleil aurait déjà envoyé des rayons, et les rayons ils s'éteigneraient pas, y a que le noyau du soleil. Alors pendant les... peut-être 4 mois, je ne sais pas combien de temps met un rayon pour venir jusqu'à la Terre... ça va vite mais faut quand même du temps, ça peut pas venir comme ça* », suivie par : « *(Non, pour la lampe) C'est pas pareil. C'est pas la lumière qu'y faut du temps, là, c'est l'électricité qui va venir à la lampe... alors dès que l'électricité arrive, la lampe réagit et elle se met à s'éclairer.* » Ici, il y a une confusion entre deux concepts bien différents : celui de vitesse (unité SI : mètre par seconde (m/s)) et celui de luminosité (unité dérivée SI : Watt (W)) qui caractérise la quantité totale d’énergie émise par unité de temps (précisions sur ceci en *annexe – X*) 4). En réalité, la lumière provenant d’une étoile a la même vitesse qu’une lumière provenant d’un objet technique, c’est le débit de lumière, *i.e.* la quantité de photons par unité de temps, ainsi que la distance à la source, qui changent. Mais surtout, d’après les explications de cet élève, la lumière semble avoir une vitesse étant donné qu’elle met un certain temps à se propager, et cette vitesse semble être considérée pour la lumière du Soleil mais pas pour la lumière d’une lampe. Il s’avère donc que la vitesse de la lumière ne serait pas la même selon si elle est envoyée par le Soleil ou par la lampe, c’est-à-dire qu’il y aurait une dépendance de la lumière en fonction de la source dont elle est issue, voire même la vitesse de la lumière pourrait être finie lorsqu’elle vient du Soleil mais infinie lorsqu’elle vient de la lampe. Toutefois, comme ces deux points ne sont pas formulés explicitement par l’interrogé et par l’interrogateur, cela reste à démontrer. En *annexe X*) 5, d’autres conceptions sur la vitesse de la lumière sont présentées, mais faisant appel à un niveau d’enseignement universitaire dans le cadre d’un diplôme de Master, à propos de la relativité.

La vitesse de la lumière est une constante universelle de la physique. (Viennot, 1982) (dans (Viennot, 1996)) se pose la question de à quoi peut renvoyer le mot « constante ». Pour l'auteure, il existe deux significations extrêmes selon si la constante est numérique ou fonctionnelle. Une constante numérique prend le statut d'un nombre à connaître ; une constante fonctionnelle indique que la grandeur est indépendante d'au moins une autre variable. Dans une enquête, il est demandé à des étudiants de première et seconde années universitaires d'utiliser un énoncé et de le compléter, levant le voile sur ce qui peut se cacher derrière c pour eux. Les réponses ne se réduisent pas à un nombre seul ($c = 299.792 \text{ km/s}$) mais à un aspect fonctionnel, et même fonction d'une dépendance ou d'une non-dépendance ou à un paramètre. De plus, les réponses fonctionnelles sont envisagées davantage sous l'angle des dépendances que des non-dépendances, ce qui est remarqué comme paradoxal par (Viennot, 1982). Beaucoup précisent que la vitesse de la lumière dépend du milieu, mais pas de quoi elle ne dépend pas. Cette difficulté à exprimer le caractère constant de la vitesse de la lumière pourrait être une nouvelle cause de conceptions erronées. L'origine de cette difficulté est multiple et détaillée dans (Viennot, 1982).

Finalement, une dernière conception mériterait d'être analysée, à propos des difficultés des élèves avec les ordres de grandeur. Dans l'air, la valeur de la vitesse d'une onde sonore est la suivante : $340,29 \text{ m/s}$ arrondie à 340 m.s^{-1} ($\sim 3,40 \times 10^2 \text{ m.s}^{-1}$). Cette valeur dépend du référentiel, et elle peut dépendre de la nature du milieu de propagation (nature du solide, liquide ou du gaz ; densité ; coefficient de compressibilité isentropique ; masse molaire) et de la température. Le rapport c/c_{son} (c_{son} = la célérité du son) est environ égale à $8,81 \times 10^5$, la vitesse de la lumière est donc presque 900.000 fois plus grande que celle du son. Il peut être imaginé que ce résultat mathématique puisse avoir peu de signification pour des collégiens. Pourtant, la plus grande valeur de la vitesse de la lumière par rapport à celle du son explique pourquoi, dans certaines situations de la vie courante, la lumière d'un éclair est bien perçue avant le bruit du tonnerre lors d'un orage.

IV) Problématique et méthodologie

Au sujet de la lumière, la synthèse de la littérature dresse un bilan de nombreuses conceptions des élèves, particulièrement sur sa nature, sur la vision (incluant sa représentation), mais aussi sur la vitesse qui lui est associée, pourtant peu investiguée. Il peut être fait l'hypothèse, ici, dans ce mémoire, de chercher si la vitesse de la lumière représente réellement un obstacle. Il peut être séduisant, alors, de modéliser la lumière avec la vitesse ; autrement dit, d'enseigner le modèle de propagation de la lumière en intégrant la vitesse, de manière à éviter certaines conceptions fausses comme l'idée que la lumière se propagerait instantanément. C'est tout ce à quoi le sujet de ce mémoire contribue.

IV) 1. Formulation de la problématique

La lumière, de nature ondulatoire ou corpusculaire, est modélisée par un rayon « correspondant » à la direction de propagation d'un signal énergétique. Le rayon lumineux est représenté par un schéma élémentaire, une droite munie d'un sens. La valeur de la vitesse est inexistante dans le modèle actuel du rayon lumineux. Fonctionnellement parlant, intégrer la vitesse donnerait un renseignement de plus pour la modélisation de la lumière. C'est un point crucial pour tenir compte du milieu de propagation dans lequel la lumière évolue lors de la schématisation.

Le programme officiel de physique-chimie au cycle 4 (MENJS, 2020) indique seulement de donner le « *[m]odèle du rayon lumineux* » d'une part, et la « *vitesse de propagation* » d'autre part, sans créer de lien entre les deux. Le milieu de propagation de la lumière est précisé seulement dans le vide (exemples de situations du tableau de la **Figure 5**), alors que la variation de la valeur de la vitesse de propagation par rapport au milieu n'est pas précisée. Le savoir fondamental est le fait que la lumière ait une vitesse qui n'est pas infinie et additionnellement, dans le programme, les élèves doivent en connaître la valeur (le programme la mentionne dans le vide).

Des signaux pour observer et communiquer

Attendus de fin de cycle

- Caractériser différents types de signaux (lumineux, sonores, radio...).
- Utiliser les propriétés de ces signaux.

Connaissances et compétences associées	Exemples de situations, d'activités et d'outils pour l'élève
<p>Signaux lumineux</p> <p>Distinguer une source primaire (objet lumineux) d'un objet diffusant.</p> <p>Exploiter expérimentalement la propagation rectiligne de la lumière dans le vide et le modèle du rayon lumineux.</p> <p>Utiliser l'unité « année-lumière » comme unité de distance.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lumière : sources, propagation, vitesse de propagation, année-lumière. - Modèle du rayon lumineux. 	<p>L'exploitation de la propagation rectiligne de la lumière dans le vide et le modèle du rayon lumineux peut conduire à travailler sur les ombres, la réflexion et des mesures de distance.</p> <p>Les activités proposées permettent de sensibiliser les élèves aux risques d'emploi des sources lumineuses (laser par exemple).</p>
<p>Signaux sonores</p> <p>Décrire les conditions de propagation d'un son.</p> <p>Relier la distance parcourue par un son à la durée de propagation.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vitesse de propagation. - Notion de fréquence : sons audibles, infrasons et ultrasons. 	<p>Les exemples abordés privilégient les phénomènes naturels et les dispositifs concrets : tonnerre, sonar...</p> <p>Les activités proposées permettent de sensibiliser les élèves aux risques auditifs.</p>

Figure 5. Extrait du BO du programme d'enseignement du cycle des approfondissements, section Physique-Chimie (MENJS, 2020).

En passant en revue les conceptions erronées sur la vitesse de la lumière et sur les difficultés rencontrées, il est rappelé que : celle-ci peut avoir une valeur infinie comme l'attestent les débats historiques (de Hosson & Kaminski, 2007; Maurines & Beaufile, 2011; Maurines & Mayrargue, 2005), en particulier pour de petites distances (ce qui est susceptible de poser des problèmes sur des exercices de la vision où ce sont justement des distances faibles qui sont généralement envisagées) (Delacôte et al., 1978), dépendre des conditions initiales (mécanique du mouvement) comme la source dont elle est issue (Maurines, 1992, 1993). Les conceptions sur la nature de la lumière montrent encore que la lumière peut s'estomper (Delacôte et al., 1978; Guesne, 1985), une idée constatée même pour un signal matériel (Maurines & Mayrargue, 2005). Un manque didactique sur la question de la vitesse dans le modèle du rayon de lumière semble régner, dans le sens où peu d'études ont porté sur la vitesse de la lumière alors que les recherches pointent des conceptions erronées.

La question du problème de représentation de la lumière est ainsi posée. La vitesse (et sa valeur) ne fait (font) pas partie de la modélisation de la lumière, contrairement à la direction et au sens qui, eux, le sont (seule la trajectoire est intégrée). L'idée est de présenter la lumière, ou plutôt le rayon lumineux, comme quelque chose qui se déplace.

Il est question de se demander si le fait de proposer un modèle du rayon lumineux intégrant la vitesse favorise les apprentissages des élèves (ou aide les élèves à dépasser certaines conceptions erronées sur la vitesse de la lumière). La problématique peut être formulée ainsi :

Comment intégrer la vitesse de la lumière dans le modèle de propagation de la lumière ? Quel est l'impact de l'utilisation d'un modèle intégrant la vitesse sur les apprentissages des élèves ?

Une première étape du travail a été d'étudier la manière dont les manuels scolaires présentent à la fois la modélisation de la lumière et la vitesse de la lumière. Une deuxième étape a été d'élaborer une activité intégrant la vitesse de la lumière au modèle du rayon lumineux.

Plusieurs pistes peuvent être étudiées, en commençant par regarder ce qui est fait dans les manuels, de regarder de quelle manière le modèle du rayon lumineux y est développé et comment la vitesse de la lumière est introduite. Hypothèse : peu de choses prendraient en compte la globalité de la vitesse dans le modèle de propagation de la lumière. Un test de séquence prenant en compte ce point reste à construire. Hypothèse : enrichir le modèle avec la vitesse aiderait à comprendre des choses sur la vitesse de la lumière.

IV) 2. Méthodologie

IV) 2. i. Étude préliminaire

Dans un premier temps, une étude comparative de plusieurs ouvrages, de niveau du cycle 4, est menée afin d'analyser différentes séquences sur la lumière soumises par différents éditeurs. Le thème étudié s'articule sur celui « des signaux pour observer et communiquer », désormais appelé thème 4 pour la suite.

Concernant cette analyse, les questions posées sont en lien avec la littérature. L'analyse de manuels scolaires s'appuie sur une grille d'analyse construite à partir de la littérature, en proposant plusieurs critères à observer ; une méthode inspirée d'un mémoire de master rédigé par (Martinez, 2010). L'observation de ces critères va aider à cadrer le recueil de données.

Corpus

Le corpus de manuels (de 2017) qui est étudié provient des éditeurs suivants :

- 1. Nathan ;
- 2. Lelivrescolaire.fr (numérique) ;
- 3. Bordas (collection ESPACE) ;
- 4. Hachette (collection Dulaurans).

Le référencement de ces manuels est exposé en *annexe X*) 6. Le choix des manuels repose sur le fait qu'ils sont parmi les éditeurs les plus « classiques ».

IV) 2. ii. Étude expérimentale

Dans un deuxième temps, une étude empirique sera conduite en classe. Les types de données recueillies sont des données sur les effets : analyse avant-après (questionnaires *pré-test* et *post-test*, copies d'élèves). Ces données sont prélevées à partir de réponses et réactions d'élèves de deux classes de 5^e : 5^e 5 (22-23 élèves) et 5^e 6 (26 élèves) du collège Croix d'Argent (Montpellier). Le chapitre enseigné dans le thème 4 s'intitule : « CHAPITRE 2 – Signaux lumineux » (le chapitre 1 correspond, lui, aux signaux sonores). En prérequis, le thème 2 (« Mouvement et interactions ») a déjà été étudié, les élèves ont donc déjà vu ce que sont « trajectoire » et « vitesse ».

Les moyennes sont renseignées :

- dans la discipline de Physique-Chimie : au premier trimestre, les classe de 5^e 5 et de 5^e 6 avaient, respectivement, des moyennes de 14,24/20 et de 14,28/20 ; au deuxième trimestre, 13,21/20 et 13,78/20.
- dans toutes les matières : au premier trimestre, les classe de 5^e 5 et de 5^e 6 avaient, respectivement, des moyennes générales de 12,48/20 et de 13,79/20 ; au deuxième trimestre, 11,96/20 et 13,63/20.

Les résultats sur la précédente évaluation sont aussi renseignés (« CHAPITRE 1 – Signaux sonores »), en moyenne : 9,16/20 pour la 5^e 5 ; 11,88/20 pour la 5^e 6.

Deux questionnaires sont élaborés. Différents types de questions composent ces questionnaires : des questions ouvertes et fermées. Une analyse *a priori* (*pré-test*) permet d'identifier les conceptions des élèves sur la lumière et sur la vitesse de la lumière. Cette analyse a le rôle d'évaluation diagnostique, en début d'apprentissage, pour cerner le niveau et les besoins de la classe par rapport aux prérequis nécessaires ou par rapport aux conceptions, de manière à anticiper les difficultés, adapter le contenu des séances, et préparer une activité sur la vitesse de la lumière dans le cadre de ce mémoire. Le *pré-test* est distribué en début du thème (donc avant de commencer le chapitre 1 sur le son). En fin de séquence sur la lumière, une évaluation sommative (notée de manière chiffrée et par compétences) fait le bilan d'apprentissage du chapitre et permet de savoir si les

objectifs sont atteints. Cette évaluation inclut des questions spécifiques en lien avec la problématique. Juste après, dans la même séance, un *post-test* identifie les progrès des élèves. Le *post-test* inclut les questions du *pré-test* et des questions complémentaires pour affiner les résultats.

Au cours de la séquence, la mise en place d'une activité axée sur l'intégration de la vitesse de la lumière dans la modélisation de la lumière est construite. Deux séances sont centrées sur la vitesse de la lumière : une séance consistant à apprécier le caractère fini de la vitesse, une séance consistant à travailler sur le fait que la vitesse de la lumière dépend du milieu de propagation. C'est lors de cette deuxième séance que le modèle de la lumière est modifié pour intégrer la vitesse de la lumière dans la modélisation.

V) Étude comparative de l'enseignement de la lumière et de la célérité de la lumière

Pour étudier la prise en charge de l'enseignement de la lumière au cycle 4, différents manuels scolaires sont confrontés sur l'ensemble du cycle en recueillant un ensemble d'observables sur les séquences qui portent sur la lumière. Une grille de critères est définie en fonction de l'étude de la littérature avec pour but d'analyser si les manuels sont susceptibles d'aider les élèves à dépasser les conceptions erronées sur la vitesse de la lumière ou, de manière opposée, de les renforcer.

V) 1. Grille d'analyse critériée

Critères généraux

Listés ci-dessous, trois premiers critères permettent de voir l'organisation et la structuration des manuels relatifs au thème de la lumière, en commençant par le chapitrage. Les signaux sonores et lumineux appartenant au même thème (il y a 4 thèmes enseignés dans le cycle 4), il s'agit d'examiner quelle importance les manuels accordent à un signal par rapport à l'autre. De même, chaque manuel choisit un ordre d'introduction.

- Critère 1 (C1) : Nombre de séquences (= chapitres), de séances (ordonnées en activités), dédiées aux signaux lumineux.
- Critère 2 (C2) : Poids de la séquence de la lumière par rapport à celle sur le son d'une part, et par rapport à l'ensemble des séquences du manuel d'autre part.
- Critère 3 (C3) : Ordre de présentation des séquences sur la lumière et sur le son.

Critères sur le modèle du rayon lumineux

La nature de la lumière, longuement traitée dans l'état de l'art (théorie, conceptions), interroge sur la manière dont elle est présentée aux élèves. La lumière est un signal accessible via le rayon lumineux, mais c'est bien un modèle. À ce titre, le mot « modèle » apparaît-il dans la définition de la lumière ou du rayon de lumière pour faire une telle distinction ?

- Critère 4 (C4) : Définition de la lumière.
- Critère 5 (C5) : Définition et représentation du modèle de propagation rectiligne de la lumière.

Critères sur la vitesse de la lumière

Pour des élèves de cycle 4, le prisme historique semble privilégié pour franchir l'étape de vitesse infinie à vitesse finie. Ce n'est pas le seul problème qui a été identifié dans le cadre théorique, notamment sur le fait que sa valeur puisse changer selon le milieu de propagation ou pourrait changer selon la source.

- Critère 6 (C6) : Types d'activités didactiques pour introduire la vitesse de la lumière.
- Critère 7 (C7) : Manière d'instruire la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide voire dans un autre milieu.

Critères de progression

Un dernier critère renseigne sur la progression de la séquence de la lumière, dans l'intention d'entrevoir à quel niveau un manuel introduit chaque notion du BO.

- Critère 8 (C8) : Progression proposée par chaque éditeur des manuels.
 - Critère 8.1 (C8.1) : À quel moment le modèle de propagation de la lumière est abordé ?
 - Critère 8.2 (C8.2) : À quel moment la valeur de la vitesse de la lumière est abordée ?
 - Critère 8.3 (C8.3) : Descriptif du programme, année après année dans le cycle 4. *En annexe.*

V) 2. Application de la grille d'analyse critériée

V) 2. i. Critères généraux

- Critère 1 (C1) : Nombre de séquences (= chapitres), de séances (ordonnées en activités), dédiées aux signaux lumineux.

Les manuels Nathan et Lelivrescolaire.fr en consacrent trois, le manuel Bordas en consacre quatre (à noter que ce manuel ne marque pas la transition entre les thèmes) et le manuel Hachette en consacre une (à noter que ce manuel accorde un module seul pour tout le thème, laissant l'enseignant plus de liberté pour faire son propre découpage). Toutefois, tous les chapitres ne s'adonnent pas à décrire et à édifier le concept de la lumière (modèle comme la vitesse). Tenant compte de cela, de manière plus minutieuse, le manuel Nathan consacre une seule séquence sur la lumière, Lelivrescolaire.fr et Bordas deux, le manuel Hachette toujours une.

Quelle que soit l'édition scolaire, au moins une activité expérimentale est organisée pour la partie vision mais, forcément, aucune pour la partie vitesse. De plus, le cheminement de la séquence est le même dans le sens où le cours sur la vitesse de la lumière arrive après avoir fait le cours sur la vision et sur le modèle du rayon.

→ Plus de détails en *annexe X*) 7.

- Critère 2 (C2) : Poids de la séquence de la lumière par rapport à celle sur le son d'une part, et par rapport à l'ensemble des séquences du manuel d'autre part.

Les pourcentages du thème 4 occupé par la lumière par rapport au son correspondent au rapport entre le nombre de ou des chapitre(s) consacré(s) à la lumière par rapport au son.

Premièrement, dans le thème 4, la lumière représente la moitié du contenu pour chaque édition (Lelivrescolaire.fr, Bordas et Hachette), l'autre moitié étant pour le son. Le manuel Nathan accorde 2/3 du thème 4 pour la lumière. Deuxièmement, par rapport aux autres thèmes du programme de physique-chimie, le thème 4 représente un faible pourcentage (11 à 17 %) relativement analogue entre les différentes éditions.

→ Plus de détails sur les calculs ayant mené aux résultats précédents en *annexe X*) 8.

- Critère 3 (C3) : Ordre de présentation des séquences sur la lumière et sur le son.

Concernant la forme de signal (signal lumineux, signal sonore) qui est enseignée avant ou après l'autre :

- Pour Nathan et Lelivrescolaire.fr : la lumière en 2^e, le son en 1^{er}.
- Pour Bordas et Hachette : la lumière en 1^{er}, le son en 2^e.

Le choix pédagogique d'enseigner d'abord le son puis la lumière (ou inversement) n'est pas toujours le même. Alors que Nathan et Lelivrescolaire.fr optent pour l'étude de la lumière après celle du son, Bordas et Hachette font le choix inverse. En outre, une séparation séquentielle (c'est-à-dire le découpage) entre signal (son, lumière) et vitesse (vitesse du son, vitesse de la lumière) est faite pour Lelivrescolaire.fr, Bordas et Hachette mais pas pour Nathan qui présente les deux notions dans le même chapitre, même si c'est dans des activités bien distinctes.

→ Plus de détails en *annexe X*) 9.

V) 2. ii. Le modèle du rayon lumineux

- Critère 4 (C4) : Définition de la lumière.

Chaque manuel est construit de la même manière : partie activités, suivie d'une partie cours (dénommée différemment selon le manuel), suivie d'une partie exercices ; seules les deux premières parties contribuent à la définition de la lumière. Le **Tableau 1** met en perspective les définitions données sur la nature de la lumière, les points communs et les différences.

Manuel scolaire (Physique-Chimie Cycle 4)	
Nathan	
Définition du cours (« L'ESSENTIEL »)	
<i>1. Les différents types de rayonnements</i>	
<i>Il existe différents types de rayonnements. On peut les classer en fonction de leur énergie qu'ils transportent.</i>	
<i>Chapitre 30 : Signaux lumineux et autres types de rayonnement</i>	
Approche	Énergie lumineuse
Lelivrescolaire.fr	
Définition du cours (« BILAN »)	
<i>2. Lumières invisibles</i>	
<i>L'œil est un récepteur de lumière visible. Il existe aussi de la lumière infrarouge et ultraviolette que nos yeux ne détectent pas. (Les ultraviolets et les infrarouges sont des lumières que l'œil ne détecte pas.)</i>	
<i>Comme le son, la lumière, qu'elle soit visible ou non, est créée par une source et se propage en ligne droite à travers certains matériaux.</i>	
<i>3. Ondes électromagnétiques</i>	
<i>La lumière et les ondes électromagnétiques (comprenant les ondes radio, aussi appelées ondes hertziennes) sont de même nature. Elles sont produites par un émetteur et sont ensuite détectées par un récepteur.</i>	
<i>Elles se propagent en ligne droite dans l'air, mais aussi dans le vide et dans certains matériaux. (Même si l'œil ne les détecte pas, les ondes radios (sic) et les autres ondes électromagnétiques sont de même nature que la lumière et se propagent dans le vide.)</i>	
<i>Chapitre 32 : Des signaux au-delà de la perception humaine</i>	
Approche	Signal lumineux

C4

Bordas	
Définition du cours (« Cours »)	
<i>2. Les rayonnements électromagnétiques</i>	
<i>La fréquence caractérise le type de rayonnement électromagnétique.</i>	
<i>La lumière est un rayonnement électromagnétique visible par l'œil humain.</i>	
<i>3. Nature des rayonnements</i>	
<i>Les rayonnements sonores ne sont pas de même nature que les rayonnements électromagnétiques.</i>	
Chapitre 35 : Rayonnements	
Approche	Fréquence (liée à l'énergie lumineuse)
Hachette	
Définition du cours (« BILAN de la fin de cycle »)	
<i>Les rayonnements visibles et invisibles</i>	
<i>Certains rayonnements lumineux ne sont pas visibles par l'œil humain comme les rayonnements infrarouges (IR) ou ultraviolets (UV).</i>	
<i>Une exposition prolongée à certains de ces rayonnements est dangereuse pour l'Homme.</i>	
<i>La lumière est un rayonnement électromagnétique visible par l'œil humain.</i>	
<i><u>Exemple</u> : Une télécommande utilise des rayonnements IR.</i>	
Module 8 : Les signaux lumineux et les signaux sonores	
Approche	Effets

Tableau 1. Observables du critère C4 pour quatre éditions de manuels scolaires.

Il n'est pas obligatoire de définir la lumière au cycle 4. Dans les repères de progressivité du thème 4 en physique-chimie, le BO indique en effet : « À la fin du cycle 3, les élèves savent identifier un signal lumineux ou sonore et lui associer une information simple binaire ». Le livre du professeur de Nathan signale : « Par respect avec les textes officiels, l'expression « signal lumineux » est réservée à la lumière visible. » Un autre livre du professeur (Lelivrescolaire.fr) indique que « [l]es activités proposées dans [un] chapitre s'appuient à plusieurs reprises sur des notions abordées au cycle 3 : éclipses, système solaire et énergie lumineuse ». L'approche appartient à chaque manuel : définition énergétique pour Nathan, définition avec les concepts de signal (émetteur, récepteur) pour le Lelivrescolaire.fr, définition avec la fréquence pour Bordas, définition par les effets pour Hachette. Lelivrescolaire.fr fait appel à des éléments du rayon lumineux (propagation en ligne droite) dans la définition de la lumière. Toujours avec Lelivrescolaire.fr, celui-ci reprend ce qui est identifié dans la

littérature pour construire une activité de déconstruction des conceptions (principe de la vision : l'œil est un capteur de lumière).

→ Plus de détails, notamment pour les approches, en *annexe X) 10*.

- **Critère 5 (C5) : Définition et représentation du modèle de propagation rectiligne de la lumière.**

Le **Tableau 2** met en perspective les définitions données du modèle de la lumière, que ce soit en activité ou dans le cours.

Manuel scolaire (Physique-Chimie Cycle 4)	
C5	Nathan
	Première apparition du modèle
	En activité expérimentale.
	Définition du modèle dans le cours
	<i>3. Propagation rectiligne de la lumière et modèle du rayon de lumière</i> <i>La lumière se propage en ligne droite. On la représente par un segment fléché. La flèche indique le sens de propagation de la lumière. C'est le modèle du rayon lumineux.</i>
	Représentation du modèle de propagation
	Ligne droite.
	Lelivrescolaire.fr
	Première apparition du modèle
	En activité expérimentale.
	Définition du modèle dans le cours
	<i>2. La trajectoire de la lumière dans l'air</i> <i>La lumière se propage de manière rectiligne (en ligne droite), on la représente donc par un rayon de lumière.</i> <i>Un faisceau de lumière est un ensemble de rayons de lumière provenant de la même source. Il peut être représenté par les deux rayons correspondant à ses limites.</i> <i>(Pour représenter le trajet de la lumière, on utilise une droite fléchée appelée rayon de lumière.)</i>
Représentation du modèle de propagation	
Droite fléchée.	
Bordas	

Première apparition du modèle
En tâche complexe.
Définition du modèle dans le cours
<i>Propagation rectiligne</i>
<i><u>Dans un milieu transparent et homogène, la lumière se propage de manière rectiligne, c'est-à-dire en ligne droite.</u></i>
<i>Généralement, le trajet suivi par la lumière n'est pas visible à l'œil. On peut cependant le représenter.</i>
<i><u>Le rayon lumineux est une modélisation du trajet suivi par la lumière.</u></i>
<i>Le rayon lumineux est un segment de droite fléchée.</i>
<i>Sa direction et son sens traduisent ceux de la propagation de la lumière.</i>
<i>Son origine, notée S, est la source de lumière.</i>
Représentation du modèle de propagation
Segment de droite fléchée.
Hachette
Première apparition du modèle
En démarche d'investigation.
Définition du modèle dans le cours
<i>La propagation rectiligne</i>
<i>La lumière se propage en ligne droite dans un milieu transparent. On dit que la propagation de la lumière est rectiligne.</i>
<i><u>Exemple</u> : Les rayons lumineux qui traversent les nuages se propagent en ligne droite.</i>
<i>Le trajet suivi par la lumière est modélisé par un rayon lumineux. On le représente par une demi-droite fléchée qui part de la source.</i>
Représentation du modèle de propagation
Demi-droite fléchée.

Tableau 2. Observables du critère C5 pour quatre éditions de manuels scolaires.

La lumière est représentée et schématisée de la même manière dans chaque manuel même si les termes géométriques employés ne sont pas exactement les mêmes : segmenté fléché (Nathan), droite fléchée (Lelivrescolaire.fr), segment de droite fléché (Bordas), demi-droite fléchée (Hachette). La terminologie de « modèle » ou de « modélisation » apparaît au moins une fois dans tous les manuels, soit en activité, soit dans le cours. À noter que les propriétés du milieu (transparence, homogénéité) sont précisées uniquement chez Bordas. En outre, chaque manuel a recours, au moins

une fois, au cas du laser pour l'enseignement de la lumière, ce qui rend compte de l'importance de cet objet technique dont l'enjeu est que la transmission de connaissances ne véhicule pas d'idées reçues. Or, dans la partie bibliographique, il a été vu que le laser pouvait être source de conceptions des élèves sur la vision, non pas qu'il soit un problème en soi, mais parce qu'il peut poser un problème dans la manière. Il reste amplement utilisé, sans doute pour son aspect directionnel mis en parallèle avec la trajectoire rectiligne du rayon lumineux.

→ Plus de détails en *annexe X) 11*.

V) 2. iii. La vitesse de la lumière

- Critère 6 (C6) : Types d'activités didactiques pour introduire la vitesse de la lumière.

Les activités en lien avec le programme concernant la vitesse de la lumière sont mises en avant dans le **Tableau 3**.

Manuel scolaire (Physique-Chimie Cycle 4)	
C6	Nathan
	Activité
	Activité documentaire : « La lumière se propage-t-elle instantanément ? » (3 documents + série de 5 questions).
	Description de l'activité
	Controverse historique et débat scientifique (problème de Cassini et observations de Rømer sur les éclipses de Io qui passe derrière Jupiter).
	Ojectif de l'activité (problématique)
	<i>La lumière a-t-elle une vitesse ?</i>
	La valeur de la vitesse de la lumière apparaît-elle dans l'activité ?
	Non.
	Lelivrescolaire.fr
	Activité
	Activité documentaire : « La lumière a-t-elle une vitesse infinie ? » (3 documents + série de 4 questions).
Description de l'activité	

Controverse historique et débat scientifique (problème de Cassini et observations de Rømer sur les éclipses de Io qui passe derrière Jupiter).
Ojectif de l'activité (problématique)
<i>Comment les scientifiques ont-ils prouvé que la lumière n'a pas une vitesse infinie ?</i>
La valeur de la vitesse de la lumière apparaît-elle dans l'activité ?
Oui (299 792 458 m/s).
Bordas
Activité
Activité documentaire : « La vitesse de la lumière » (3 documents + série de 4 questions).
Description de l'activité
Document explicatif (la lumière est une onde électromagnétique qui se déplace à une certaine vitesse) + Contexte historique (Alhazen, Galilée, Rømer, Bradley) + application de la vitesse de la lumière (fibre optique). Problème de Cassini, observations de Rømer sur les éclipses de Io qui passe derrière Jupiter.
Ojectif de l'activité (problématique)
<i>Comment les scientifiques ont-ils prouvé que la lumière n'a pas une vitesse infinie ?</i>
La valeur de la vitesse de la lumière apparaît-elle dans l'activité ?
Oui (300 000 km/s, mais aussi : 299 792 km/s dans le vide, 299 792 km/s dans l'air, 225 563 km/s dans l'eau, 200 000 km/s dans le verre, 123 967 km/s dans le diamant).
Hachette
Activité
Activité documentaire : « La lumière des étoiles nous parvient-elle instantanément ? » (2 documents + série de 4 questions).
Description de l'activité
La lumière met une certaine durée pour parvenir jusqu'à la Terre (8 min depuis le Soleil, 100 000 ans depuis les étoiles les plus éloignées de la Voie lactée, 10^{11} ans depuis les étoiles les plus éloignées dans l'Univers visible). Les astronomes utilisent une autre unité de distance appelée l'« année-lumière ».
Ojectif de l'activité (problématique)
<i>Pourquoi utilise-t-on l'année-lumière pour évaluer des distances en astronomie ?</i>
La valeur de la vitesse de la lumière apparaît-elle dans l'activité ?
Oui (300 000 km/s).

Tableau 3. Observables du critère C6 pour quatre éditions de manuels scolaires.

Même si la transposition didactique peut varier selon les manuels, l'activité documentaire est le type d'activité sollicité pour initier les élèves à la vitesse de lumière. L'activité expérimentale n'est pas sollicitée pour des raisons évidentes. Il est intrigant, voire remarquable, de constater que les activités se basent principalement sur l'histoire de la vitesse de la lumière. Nathan et Lelivrescolaire.fr se servent du même contexte historique, mais la problématique est formulée différemment.

Dans l'activité de Nathan, les élèves doivent comparer des distances pour réaliser que la vitesse de la lumière n'est pas infinie. Dans le livre du professeur du livrescolaire.fr, il est stipulé que la problématique apporte une réponse à la question donnée en titre de leur activité. Le prolongement et l'effort demandé aux élèves est plutôt de comprendre la méthode utilisée pour arriver au résultat annoncé, l'attention est tournée vers l'analyse des documents et la compétence de « lire et comprendre des documents scientifiques pour en extraire des informations ». Bordas expose plusieurs éléments clés de l'histoire qui ont fait évoluer le concept de vitesse de la lumière. Hachette ne part pas vraiment sur de l'histoire mais conserve un contexte astronomique comme les autres. L'intégration de l'histoire dans l'enseignement peut être bénéfique comme l'ont démontré de précédents travaux de la littérature ((Maurines & Mayrargue, 2005; de Hosson & Kaminski, 2007)), alors même que (de Hosson & Kaminski, 2007) alertent sur le manque d'outils pédagogiques pour orienter les séquences d'enseignement vers l'histoire. La place de l'histoire dans l'enseignement de cette séquence semble plus systématique que pour d'autres notions. Les interprétations sont possiblement liées au fait : qu'il faille trouver un substitut de situation lié à l'impossibilité de faire des expériences en classe, que l'histoire de la physique de la lumière soit plus documentée, que la lumière en particulier engendre des conceptions depuis la nuit des temps et qu'il est donc rationnel de s'y attarder.

Tandis que Nathan ne révèle pas la valeur de la vitesse de la lumière (l'objectif de l'activité est seulement de réaliser que la vitesse de la lumière n'est pas infinie), Lelivrecolaire.fr, qui a pourtant le même objectif, la fournit ; ce choix a été discuté. Bordas (qui adopte la même stratégie que Lelivrecolaire.fr) et Hachette la donnent également. L'activité d'Hachette n'est d'ailleurs pas centrée sur la vitesse de la lumière en elle-même, mais sur l'intérêt d'utiliser l'unité année-lumière plutôt que le mètre ou le kilomètre.

→ Plus de détails en *annexe X) 12*.

- Critères 7 (C7) : Manière d'instruire la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide voire dans un autre milieu.

Les activités en lien avec le programme concernant la valeur de la vitesse de la lumière sont mises en avant dans le **Tableau 4**.

Manuel scolaire (Physique-Chimie Cycle 4)	
Nathan	
Institutionnalisation de la valeur de la vitesse de la lumière	
<i>4. La vitesse de la lumière</i>	
<i>La lumière ne se déplace pas instantanément, elle met donc une certaine durée pour parcourir une distance.</i>	
<i>La vitesse de la lumière dans le vide et l'air est de 300 000 km/s.</i>	
<i>Remarque : La valeur de la vitesse de la lumière dépend du milieu traversé.</i>	
Où est-ce que la valeur de la vitesse (dans le vide) est donnée ?	
Dans le cours.	
La valeur est-elle précise (299.792.458 m/s) ou arrondie (300.000.000 m/s) ?	
Valeur arrondie dans le cours (300.000 km/s).	
Le milieu de propagation est-il pris en compte ?	Des valeurs dans d'autres milieux de propagation sont-elles données ?
Oui.	Non dans le cours, oui en activité.
Est-il bien précisé que la valeur dans le vide est différente de la valeur dans l'air ?	
Non (300.000 km/s).	
Lelivrescolaire.fr	
Institutionnalisation de la valeur de la vitesse de la lumière	
<i>1. La lumière, une vitesse finie</i>	
<i>La lumière ne se propage pas de manière instantanée mais possède une vitesse mesurable.</i>	
<i>La vitesse précise de la lumière est presque la même dans l'air et est de 299 792 458 m/s.</i>	
<i>La vitesse de la lumière n'est pas la même dans tous les milieux (par exemple, elle vaut 225 000 000 m/s dans l'eau et 124 000 000 m/s dans le diamant).</i>	
<i>(La vitesse de la lumière dans le vide et dans l'air vaut environ 300 000 km/s.)</i>	
Où est-ce que la valeur de la vitesse (dans le vide) est donnée ?	
En activité et dans le cours.	
La valeur est-elle précise (299.792.458 m/s) ou arrondie (300.000.000 m/s) ?	
Les deux : précise (299.792.458 m/s) et arrondie (300.000 km/s) dans le cours.	

C7

Le milieu de propagation est-il pris en compte ?	Des valeurs dans d'autres milieux de propagation sont-elles données ?
Oui.	Oui, dans le cours.
Est-il bien précisé que la valeur dans le vide est différente de la valeur dans l'air ?	
Oui (approximation à 300.000 km/s dans les deux milieux).	
Bordas	
Institutionnalisation de la valeur de la vitesse de la lumière	
<i>1. Vitesse de la lumière</i>	
<i>La lumière semble se propager instantanément. Pourtant, elle possède une vitesse finie, de valeur très grande, qui dépend du milieu de propagation.</i>	
<i><u>Dans le vide ou dans l'air, la lumière se propage à une vitesse de 300 000 km/s.</u></i>	
<i>Comme la lumière n'est pas un objet matériel, on parlera plutôt de célérité que de vitesse de lumière.</i>	
<i><u>On appelle célérité c de la lumière sa vitesse de propagation.</u></i>	
Où est-ce que la valeur de la vitesse (dans le vide) est donnée ?	
En activité et dans le cours (Bordas est le seul à évoquer le terme de « célérité »).	
La valeur est-elle précise (299.792.458 m/s) ou arrondie (300.000.000 m/s) ?	
Les deux : précise (299.792 km/s) en activité et arrondie (300.000 km/s) dans le cours.	
Le milieu de propagation est-il pris en compte ?	Des valeurs dans d'autres milieux de propagation sont-elles données ?
Oui.	Oui, en activité.
Est-il bien précisé que la valeur dans le vide est différente de la valeur dans l'air ?	
Non (300.000 km/s).	
Hachette	
Institutionnalisation de la valeur de la vitesse de la lumière	
<i>Chez soi, lorsqu'on appuie sur un interrupteur, la lumière semble apparaître instantanément. On a longtemps cru que les phénomènes lumineux étaient instantanés : il y avait de la lumière ou il n'y en avait pas... C'est le savant arabe Alhazen, au X^e siècle, qui est le premier à douter de son instantanéité, mais c'est Galilée, au XVII^e siècle, qui est le premier à tenter d'en mesurer la vitesse de propagation.</i>	
<i>On sait maintenant que la lumière se propage dans le vide à la vitesse de 300 000 km/s.</i>	
Où est-ce que la valeur de la vitesse (dans le vide) est donnée ?	
En activité.	
La valeur est-elle précise (299.792.458 m/s) ou arrondie (300.000.000 m/s) ?	

Arrondie (300.000 km/s), mais sans spécifier que cette donnée est arrondie (incohérence).	
Le milieu de propagation est-il pris en compte ?	Des valeurs dans d'autres milieux de propagation sont-elles données ?
Non.	/
Est-il bien précisé que la valeur dans le vide est différente de la valeur dans l'air ?	
/	

Tableau 4. Observables du critère C7 pour quatre éditions de manuels scolaires.

Bien que le manuel Hachette ne revienne pas sur la valeur de la vitesse de la lumière dans la partie cours, ni sur le fait que la vitesse soit finie, c'est le cas pour les trois autres manuels. Deux points sont à relever sur ce qu'il faut connaître du cours. Le premier, elle est mobilisée à côté d'une image basée sur la distance Terre-Soleil (~ 150.000.000 km = 1 ua (unité astronomique)) pour Nathan et Bordas et sur l'« éclipse » de Io pour Lelivrescolaire.fr. Le deuxième, la négation du mot « instantané » (*ne se déplace pas instantanément*), ou du même champ lexical, est employée. Hachette et Bordas vont plus loin dans le sens où ils présupposent que les élèves ont l'idée que la lumière se propage avec une vitesse infinie. C'est pourquoi Bordas avertit que « [l]a lumière semble se propager instantanément » (le mot « semble » apporte cette nuance et fait la différence), avant de continuer que, « [p]ourtant, elle possède une valeur finie ».

Cela étant, Lelivrescolaire.fr est le seul manuel qui donne la valeur précise de la vitesse de la lumière dans l'unité du SI (m/s), Bordas donne la valeur précise en km/s. Nathan et Hachette choisissent une valeur arrondie, en km/s. Ce qui est important, c'est que chaque manuel tient compte de la valeur finie de la vitesse en appliquant ce principe au calcul de distances en astronomie : pour Nathan (4^e ou 3^e), l'activité documentaire « Comment calculer la distance parcourue par la lumière dans l'Univers ? » ; pour Lelivrescolaire.fr (4^e), l'activité documentaire « Quelle est la taille de la nébuleuse du Crabe ? » ; pour Bordas (4^e), l'activité de démarche d'investigation « La distance Terre-Lune » ; pour Hachette (3^e), l'activité documentaire « La mesure de la distance Terre-Lune a-t-elle toujours été précise ». Les calculs de distance pourront amener à la définition de l'unité de longueur qu'est l'année-lumière ; Bordas y consacre d'ailleurs toute une activité, Hachette également.

→ Plus de détails en *annexe X*) 13.

V) 2. iv. Progression

- Critère 8 (C8) : Progression proposée par chaque éditeur des manuels.

- Critère 8.1 (C8.1) : À quel moment le modèle de propagation de la lumière est abordé ?

Le modèle est introduit dans tous les manuels, la première année du cycle 4, c'est-à-dire en 5^e.

- Critère 8 (C8) : Progression proposée par chaque éditeur des manuels.

- Critère 8.2 (C8.2) : À quel moment la valeur de la vitesse de la lumière est abordée ?

Alors que le modèle de la lumière est introduit en classe de 5^e, il faut généralement attendre la 4^e pour la vitesse de la lumière. C'est la progression du livrescolaire.fr, mais aussi de Bordas et d'Hachette, aussi bien pour étudier si la lumière se propage de manière instantanée ou non, que pour en délivrer la valeur aux élèves. L'exploitation de la vitesse dans le calcul des distances est plutôt réservée à la 4^e (Nathan, Lelivrescolaire.fr, Bordas) et même à la 3^e (Nathan, Hachette).

Le manuel de Nathan s'accorde à amener à la fois le caractère fini de la vitesse de la lumière (activité) ainsi que sa valeur (cours) dès la 5^e. L'édition laisse quand même le choix pour aborder cela en 4^e. En effet, le chapitre en question se trouve à la fois dans le livre de 5^e et dans le livre de 4^e. Dans tous les manuels, il est constaté que les calculs de distances utilisant la vitesse de la lumière ne sont pas faits au niveau 5^e.

- Critère 8 (C8) : Progression proposée par chaque éditeur des manuels.

- Critère 8.3 (C8.3) : Descriptif du programme, année après année dans le cycle 4.

Cf. annexe X) 14.

V) 2. v. Récapitulatif

Les critères généraux de la grille d'analyse (C1, C2, C3) ont des résultats comparables, sauf sur le critère C3 pour lequel les éditions Nathan et Lelivrescolaire.fr introduisent le son puis la lumière dans leurs manuels, tandis que Bordas et Hachette introduisent la lumière puis le son. Les critères sur le modèle du rayon lumineux (C4, C5) ainsi que les critères sur la vitesse de la lumière (C6, C7) reviennent sur les attendus du BO. En scrutant le critère C5 (définition et représentation du modèle de propagation de la lumière), il n'est jamais fait mention de la vitesse. La lumière se propage, sans apporter plus de précisions. En effet, la vitesse survient après avoir enseigné la manière dont la lumière se propage. Le critère C6, sur le type d'activités didactiques pour introduire la vitesse de la lumière, revient sur les erreurs et conceptions qui existent en établissant un cadre historique de concert

avec des observations astronomiques. Le critère C7, sur la manière d'instruire la valeur de la vitesse de la lumière, dénote le fait que la valeur de la vitesse est généralement donnée sous sa forme arrondie, toujours en précisant le milieu du vide.

Ce qui est intéressant de remarquer (critère C7), c'est qu'il n'existe aucune activité permettant d'étudier l'influence du milieu de propagation sur la vitesse de la lumière : les manuels Nathan, Lelivrescolaire.fr et Bordas donnent des valeurs (généralement dans le cours), le manuel Hachette n'en parle tout simplement pas. Or, un réel enjeu pédagogique peut exister pour mieux appréhender la question de la propagation de la lumière dans un milieu différent du vide (air, eau, verre, ...). Il n'est pas certain que les élèves réalisent que la lumière puisse se propager à une vitesse différente de 300 000 000 m/s lorsque le milieu n'est pas le vide. Cette prise de conscience pourrait, possiblement, être déclenchée en modélisant la lumière, non seulement avec une droite munie d'un sens, mais aussi avec le paramètre vitesse intégré dans la modélisation. La section VI) s'investit à répondre à ce problème.

VI) Situation expérimentale

Selon une démarche expérimentale, deux questionnaires (*pré-test*, *post-test*) concourent à collecter des informations sur la compréhension des élèves de 5^e sur la lumière. Les résultats qualitatifs et quantitatifs sont rendus anonymes quoique les mentions « NOM » et « Prénom » sont demandées sur les copies. Une partie de l'évaluation sommative est également mise à contribution pour étudier les apprentissages des élèves.

Entre ces moments d'évaluation, deux activités documentaires (une activité par séance) sont proposées. Une première activité est intitulée : « Est-ce que la vitesse de la lumière est infinie ? ». Une deuxième activité d'expérimentation est intitulée : « Quelle est la vitesse de la lumière dans un milieu différent du vide ? ». Dans cette activité, un nouveau modèle de la lumière est proposé par rapport au modèle conventionnel. Ce modèle, qui complète celui présenté jusqu'à maintenant en intégrant la vitesse, est repris en trace institutionnelle dans le support de cours des élèves, tout en prenant soin de spécifier que ce n'est pas standard (dès la 4^e, pour ne pas perturber les élèves et le futur professeur, il ne sera plus nécessaire de l'employer et d'intégrer la vitesse dans la modélisation).

VI) 1. Analyse *pré-test* pour la construction d'un modèle

VI) 1. i. Présentation du *pré-test*

Le sujet complet du test est en *annexe X) 15*. Les questions du *pré-test* sont divisées en quatre parties. Une correction est proposée, *annexe X) 16* ; la correction n'a pas été faite avec les élèves, pour ne pas influencer le déroulement de la séquence (cours + activités + exercices éventuellement). La première partie consiste à appréhender la représentation qu'ont les élèves sur la lumière par des questions ouvertes. La deuxième partie questionne, de manière fermée cette fois-ci, les conceptions sur la vitesse :

- À ton avis, la lumière se propage : avec une vitesse finie. avec une vitesse infinie. je ne sais pas. : l'intérêt de cette question est d'acquérir des données quantitatives qui, comme cela a été souligné dans la revue bibliographique, font défaut.

- À ton avis, la vitesse de la lumière provenant de [X] est-elle : plus grande[,] plus petite[,] égale[,] je ne sais pas[,] à celle provenant de [Y] ? : l'objectif de cette question est d'évaluer si les élèves pensent que la vitesse de la lumière dépend de la source dont elle est issue (les sources sont, de surcroît, de moins en moins puissantes), en comparant :
 - o une source primaire ($X = \text{Soleil}$) et une source secondaire ($Y = \text{Lune}$) ;
 - o deux sources primaires avec des ordres de grandeur en termes de distance très différents ($X = \text{Soleil}$ (grandes distances) et $Y = \text{lampe}$ (petites distances)) ;
 - o deux sources primaires avec des ordres de grandeur en termes de distance similaires ($X = \text{lampe}$ et $Y = \text{flamme d'une bougie}$ (échelles des petites distances)).

La troisième partie cherche, par des questions ouvertes, à appréhender la manière qu'ont les élèves à décrire le mouvement de la lumière, notamment si les outils « trajectoire » et « vitesse » se retrouvent dans la description du mouvement d'un tel signal. Enfin, la quatrième partie laisse la possibilité de répondre, à l'aide d'une réponse ouverte ou d'une schématisation à compléter, à des problèmes en lien avec la vision. Au-delà d'une réponse juste ou fausse, l'objectif est de voir si l'élève préfère décrire par les mots ou par la schématisation la lumière.

Les *pré*-tests sont distribués avant d'entamer les deux chapitres du thème 4. La première classe n'a pas reçu d'explication des consignes mais la deuxième classe oui car des questions avaient été posées par des élèves de la première pour préciser ce qui était demandé.

- Pour les 5^e 5, sur 22 élèves, aucun absent (donc 22 copies). Le test est distribué 15 minutes avant la fin de l'heure.
- Pour les 5^e 6 GR1, sur 12 élèves, 2 absents (donc 10 copies). Pour les 5^e 6 GR2, sur 14 élèves, 1 absent (donc 13 copies). Le test est distribué 20 minutes avant la fin pour laisser plus de temps de réflexion et de rédaction.

Pour chaque partie comprenant des questions ouvertes, l'analyse des données est réalisée grâce à une grille de codage. La plupart des catégories de réponses proviennent de l'identification des concepts et conceptions de la revue de la littérature. Les réponses sont présentées à l'aide de graphiques à barres (histogrammes). Quant aux parties avec questions fermées, l'analyse est visualisée à l'aide de graphiques en secteurs (diagrammes circulaires). Les résultats étant, généralement, similaires entre les deux classes, les élèves sont regroupés dans un même ensemble (dans une même « super classe ») pour les valeurs exprimées en pourcentages (*annexe X*) 17 pour voir un exemple simple). Le nombre total de copies, noté n , est de 45 (= 22 + 23).

VI 1. ii. Résultats du pré-test et représentation des conceptions

• Partie 1

Les résultats de la partie 1 sont affichés et développé en **Figure 6** et **Figure 7**.

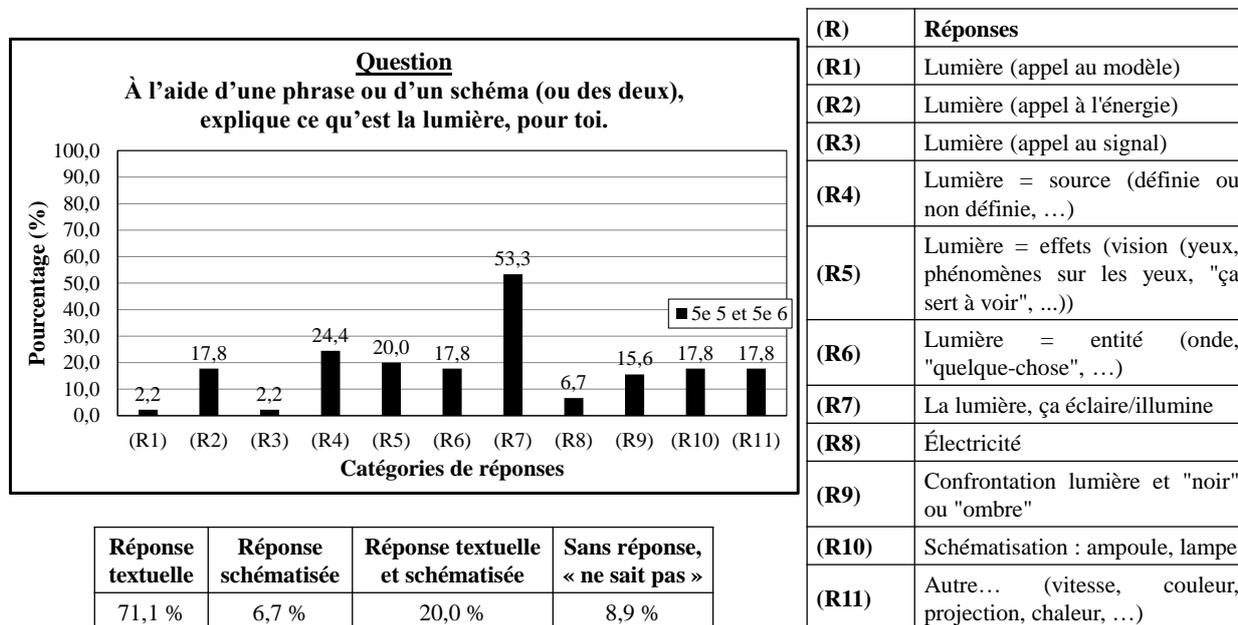


Figure 6. Statistiques de la première question (n = 45).

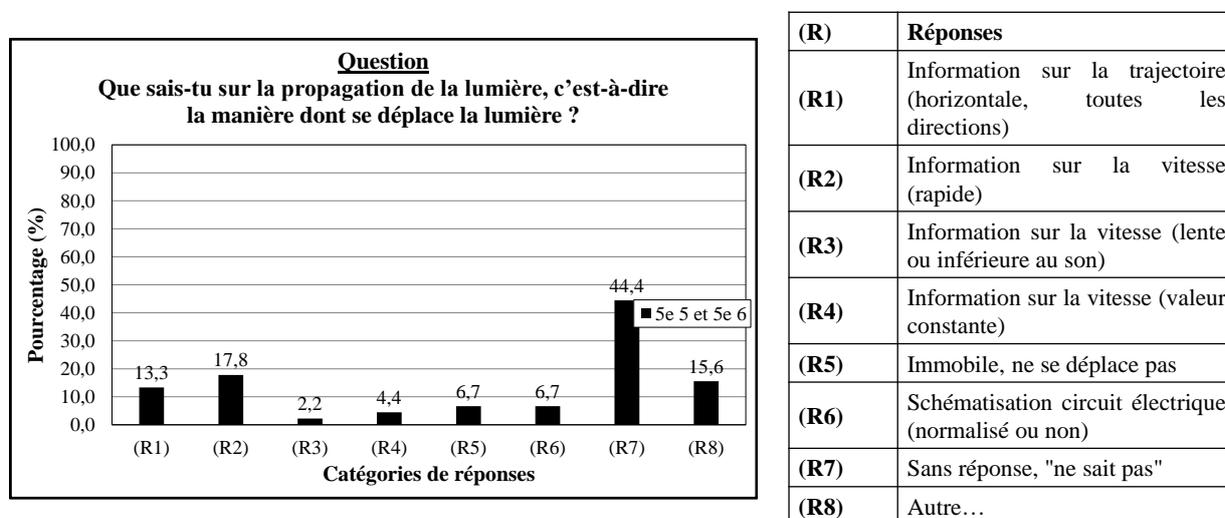


Figure 7. Statistiques de la deuxième question (n = 45).

Discussion : Plus de la moitié des élèves (53,3 %) définissent la lumière par son effet d'éclairement. 24,4 % des élèves la définissent par sa source en mentionnant notamment la lumière du Soleil, 20,0 % par la vision en indiquant que ça permet de voir. En somme, 97,7 % des élèves décrivent la lumière par sa source ou par son effet, comme cela a été entrevu dans la bibliographie. Exemples (les erreurs de syntaxe ou d'orthographe sont corrigées) : « *C'est blanc et ça permet d'utiliser nos yeux* » ; « *Une énergie solaire qui permet d'éclairer* » ; « *Pour moi c'est une source provenant d'un endroit qui sert à éclairer* » ; « *C'est ce qui nous permet de voir* ». Cependant, une grande proportion à hauteur de 40,0 % (22,2 % sur trois types de réponses ; 17,8 % sur un type de réponse) arrivent à définir la lumière en utilisant, en même temps, un modèle ou selon la propagation d'un signal ou d'une énergie, ou bien à accorder une entité propre à la lumière. Quelques exemples : « *Pour moi, la lumière est un rayon lumineux qui permet d'éclairer une salle entière* » (catégorie (R1) présente) ; « *La lumière est une énergie éclairant notre planète. Elle provient soit d'une chaleur ou d'une électricité* » (catégorie (R2) présente) ; « *La lumière est quelque chose qui peut servir à éclairer ou à faire passer un message* » (catégorie (R3) présente).

Au sujet de la propagation de la lumière, beaucoup d'élèves n'ont pas su répondre (44,4 %), démontrant la difficulté de répondre à cette question à leur niveau. Pour ceux ayant répondu, seuls 13,3 % évoquent la trajectoire, 17,8 % la vitesse.

- Partie 2

Les résultats de la partie 2 sont affichés et développés en **Figure 8**.

Discussion : 40,0 % des élèves considèrent la vitesse de la lumière comme infinie, 4,4 % ne savent pas trancher entre le caractère fini et infini. En somme, 44,4 % des élèves ne savent pas que la lumière a une vitesse finie à l'entrée du cycle 4.

En lien avec la bibliographie, l'influence de la source sur la vitesse de la lumière est clairement visible. Les résultats de la **Figure 8** montrent que : 68,9 % indiquent que la vitesse de la lumière du Soleil est supérieure à celle de la Lune, 57,8 % indiquent que la vitesse de la lumière du Soleil est supérieure à celle d'une lampe, 42,2 % indiquent que la vitesse de la lumière d'une lampe est supérieure à celle d'une bougie. Ce taux de réponse à la première proposition diminue au fil des trois questions, corrélé avec la luminosité (puissance intrinsèque) ou le flux lumineux (puissance extrinsèque) de la source lumineuse qui diminue entre le Soleil, la Lune, la lampe et la flamme d'une bougie. Il reste difficile de dire si cette corrélation peut être considérée comme une causalité, surtout

que la réponse opposée (vitesse plus petite) ne suit pas la même évolution (2,2 % puis 15,6 % puis 13,3 %). Parallèlement, au fil des questions, le taux de « je ne sais pas » croît (de 6,7 à 22,2 %).

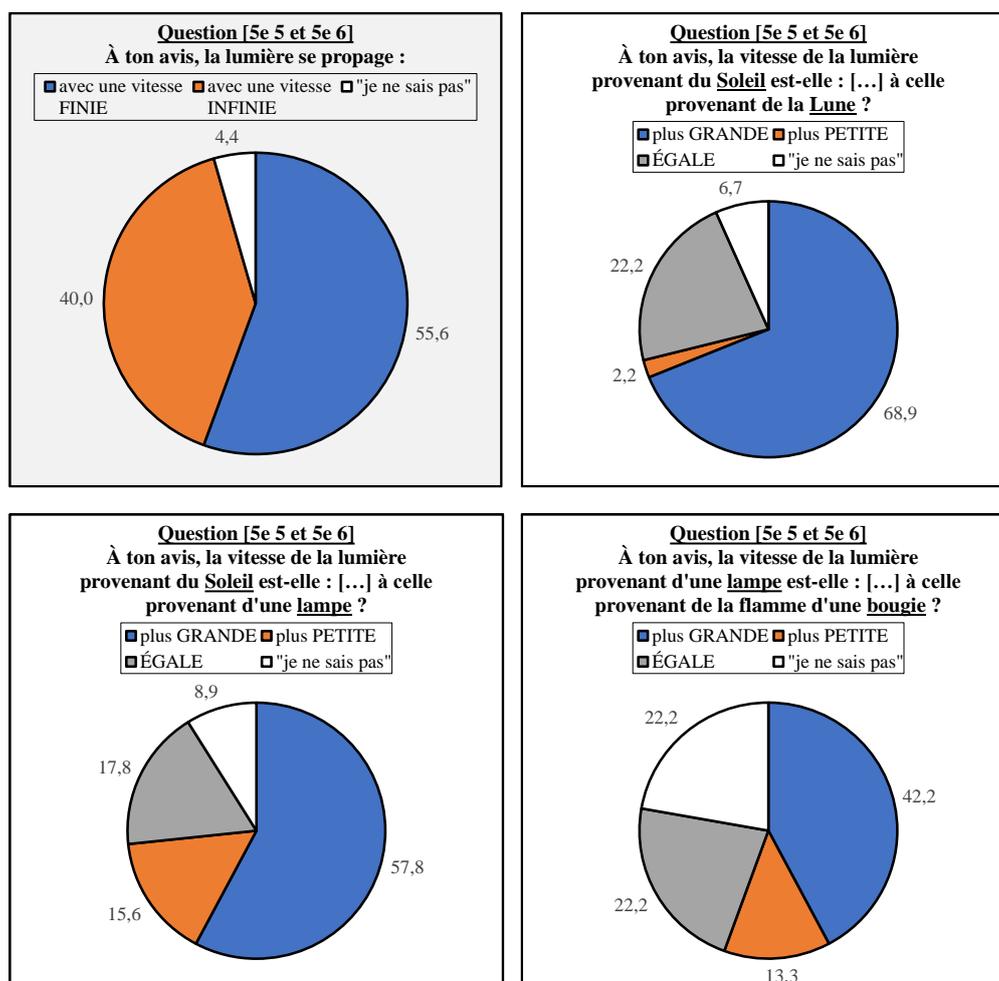


Figure 8. Statistiques des questions de la partie 2 (n = 45).

Dans le graphe à fond grisé, la bonne réponse est « avec une vitesse finie » (remplissage bleu). Dans les graphes à fond blanc, la bonne réponse est, à chaque fois, « ÉGALE » (remplissage gris).

- **Partie 3**

Les résultats de la partie 3 sont affichés et développés en **Figure 9**.

Discussion : Alors que 64,4 % des élèves utilisent des notions de « trajectoire » et de « vitesse » pour décrire un mouvement matériel, ce nombre tombe à 24,4 % pour décrire le mouvement de la lumière. Ces résultats restent à nuancer, étant donné que pour les deux questions de cette partie, un fort pourcentage d'élèves s'abstient de répondre (respectivement 48,9 % et 73,3 %).

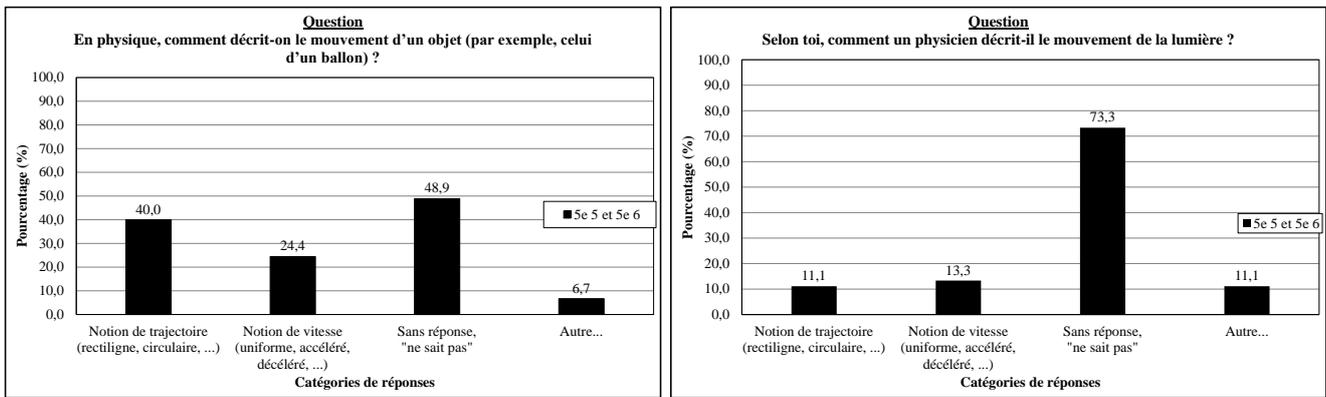


Figure 9. Statistiques des questions de la partie 3 (n = 45).

- Partie 4

Les résultats de la partie 4 sont affichés et développés (Tableau 5, Tableau 6, Tableau 7).

Question : À l'aide d'une phrase et/ou d'un schéma (en traçant sur l'image), explique comment la personne voit l'arbre et la flamme de la bougie.

Réponse textuelle	Réponse schématisée	Réponse textuelle et schématisée	Sans réponse, « ne sait pas »
37,8 %	33,3 %	6,7 %	22,2 %

Catégorie de réponse	Pourcentage de réponse
Œil actif	8,9 %
Œil passif	8,9 %
Œil (sans précision, "grâce à l'œil")	28,9 %
Besoin d'une source de lumière (lumière, Soleil, ...)	51,1 %
Modélisation de la lumière (rayon lumineux incorrect, flèche)	24,4 %
Modélisation de la lumière (rayon lumineux correct)	0,0 %
Autre...	4,4 %

Tableau 5. Statistiques de la question sur le principe de la vision dans la partie 4 ; en rouge, les conceptions, en vert, les notions correctes (n = 45).

Question : À l'aide d'une phrase et/ou d'un schéma (en traçant sur l'image), explique : si le cube / la pyramide est dans la lumière ou dans l'ombre.

Réponse textuelle	Réponse schématisée	Réponse textuelle et schématisée	Sans réponse, « ne sait pas »
28,9 %	31,1 %	35,6 %	8,9 %

Catégorie de réponse	Pourcentage de réponse
Cube dans la lumière, pyramide dans l'ombre	6,7 %
Cube dans l'ombre, pyramide dans la lumière	57,8 %
Cube dans la lumière, pyramide dans la lumière	8,9 %
Cube dans l'ombre, pyramide dans l'ombre	20,0 %
Modélisation de la lumière (rayon lumineux incorrect, flèche)	51,1 %
Modélisation de la lumière (rayon lumineux correct)	0,0 %
Modélisation d'un faisceau lumineux (cône incorrect)	20,0 %
Modélisation d'un faisceau lumineux (cône correct)	31,1 %
Légende des zones (zone de lumière, zone d'ombre)	17,8 %
Autre...	0,0 %

Tableau 6. Statistiques de la question sur la position d'un objet dans une zone éclairée ou dans une zone d'ombre dans la partie 4 ; en rouge, les mauvaises réponses et conceptions, en vert, les bonnes réponses et notions (n = 45).

Question : À l'aide d'une phrase et/ou d'un schéma (en traçant sur l'image) : Que voit-on par le trou T1 ? Que voit-on par le trou T2 ? Que voit-on par le trou T3 ?

Réponse textuelle	Réponse schématisée	Réponse textuelle et schématisée	Sans réponse, « ne sait pas »
37,8 %	15,6 %	24,4 %	20,0 %

Catégorie de réponse	Pourcentage de réponse
T1 : on voit la flamme	20,0 %
T1 : on ne voit pas la flamme (ou on voit autre chose)	57,8 %
T2 : on voit la flamme	31,1 %
T2 : on ne voit pas la flamme (ou on voit autre chose)	46,7 %
T3 : on voit la flamme	57,8 %
T3 : on ne voit pas la flamme.	20,0 %

Œil actif	6,7 %
Œil passif	0,0 %
Œil (trait non fléché)	28,9 %
Modélisation de la lumière (rayon lumineux incorrect, flèche)	31,1 %
Modélisation de la lumière (rayon lumineux correct)	0,0 %
Autre...	0,0 %

Tableau 7. Statistiques de la question sur la visibilité de la flamme d'une bougie à travers un écran percé ; en rouge, les mauvaises réponses et conceptions, en vert, les bonnes réponses et notions (n = 45).

Discussion : Bien que les trois dernières questions soient globalement bien réussies, le nombre d'élèves ayant recourt à la schématisation est faible, et lorsque c'est le cas, elle est habituellement fautive (par exemple, rayon lumineux incorrect car analogue à une flèche (au lieu de positionner l'information sur le sens au milieu du trait)).

- Partie feed-back

Les résultats de la partie sur le retour des élèves sont affichés et développés :

- À la question « *As-tu déjà étudié la lumière ?* » : 28,9 % de « Oui », 67,7 % de « Non » (4,4 % n'ont pas répondu).
- À la question « *Te souviens-tu de ce que tu as appris sur la lumière l'an dernier (cycle 3) ?* » : 8,9 % de « Oui », 57,8 % de « Non » (33,3 % n'ont pas répondu).

Discussion : En rentrant en 5^e, environ 2/3 des élèves disent ne pas avoir reçu d'enseignement sur la lumière, dont moins de 10 % se souvenant de ce qu'ils ont appris.

VI) 2. Activités pour la construction d'un modèle

VI) 2. i. Activité documentaire « Est-ce que la vitesse de la lumière est infinie ? »

La vitesse de propagation de la lumière est un attendu de fin de cycle 4. En 5^e, presque un élève sur deux n'a pas connaissance du caractère fini de la vitesse de la lumière. Une activité est entièrement dédiée sur ce point, s'imposant comme une réponse aux résultats analysés avec les *pré*-tests. L'activité s'inspire didactiquement de l'activité « La lumière se propage-t-elle instantanément

? » de Nathan (*annexe X) 12 bis repetita, critère C6 de l'analyse des manuels*) ainsi que de l'activité « La lumière a-t-elle une vitesse infinie ? » dans le manuel Lelivrescolaire.fr dans une moindre mesure : problème de Cassini et observations de Rømer (approche historique, le débat est la situation contextualisante). La valeur de la vitesse de la lumière n'est pas donnée car l'objectif est centré sur, et seulement sur, le caractère fini de la vitesse. Elle ne figure donc pas dans les documents, ni dans les questions, ni dans la correction lors de la mise en commun. En revanche, en fin d'activité, elle est donnée (cadre « CE QUE JE RETIENS » contenant des textes à trous), de fait, lors de la phase d'institutionnalisation. De même, dans le cours qui répète ce qu'il faut retenir de l'activité, la valeur de la vitesse de la lumière est à nouveau institutionnalisée. L'activité s'inspire également de l'activité « La vitesse de la lumière » de Bordas (*annexe X) 12 bis repetita, critère C6 de l'analyse des manuels*) : introduction à la « célérité », ajout d'un document sur l'utilisation de la lumière dans la fibre optique. Contrairement au Bordas, la fibre optique est mise à contribution dans l'intérêt de comprendre que la lumière a une vitesse, et pas seulement pour donner une application de la lumière comme signal.

La **Figure 10** et la **Figure 11** renvoient à l'activité ; la **Figure 12** vers un exemple de correction complète (en cours, une correction nettement plus succincte est à envisager).

5^e - THÈME : Des signaux pour observer et communiquer
CHAPITRE 2 : Signaux lumineux (5^e)

Activité documentaire Est-ce que la vitesse de la lumière est infinie ?

Contexte HISTOIRE DES SCIENCES

Pendant des siècles, pour les scientifiques, il était acquis que la lumière se propageait de manière instantanée (vitesse de la lumière infinie). Un acquis qui a été remis en cause, au X-XI^e siècle, par le scientifique arabe Alhazen qui s'est demandé s'il était, en fait, possible que la lumière mette du temps à se déplacer (vitesse de la lumière finie). Les savants n'étaient donc pas d'accord entre eux. Et vous ?



Portrait de Hsoun Ibn al-Haytham (latinisé Alhazen).

Problématique → La lumière se propage-t-elle de manière finie ou infinie ?

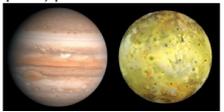
Hypothèse(s) Je pense que

Document 1 Les observations astronomiques inexpliquées de Cassini

Le débat sur la vitesse de la lumière (infinie ? finie ?) a duré jusqu'au XVII^e siècle. Le scientifique italien Galileo Galilei (connu sous l'appellation de Galilée) tenta une expérience pour apporter une réponse à ce débat, mais sans succès car la technologie n'était pas assez avancée à l'époque. C'est la résolution du « problème de Cassini » qui est venu mettre un terme à cette question.

En 1671, l'astronome français Giovanni Domenico Cassini (ou Jean-Dominique Cassini, dit Cassini IV) observe le ciel et cherche des éclipses¹, plus particulièrement des éclipses de Io², un satellite naturel de la planète Jupiter.

Cassini est capable de prédire, en se basant sur les mouvements des astres, les jours et heures des éclipses de Io, mais il rencontre un problème : ses prévisions ne sont pas toujours exactes. Il constate, parfois, un écart de plusieurs minutes entre l'éclipse et l'horaire qu'il prévoyait.



1. À gauche : Jupiter (vue par la sonde spatiale Voyager 2 en 1979, image modifiée en 1990). À droite : Io (vue par la sonde spatiale Galileo en 1995), une lune de Jupiter.

1. Éclipse : Occultation (= disparition) totale ou partielle, d'une source primaire de lumière ou d'un objet diffusant. Aide sur ce sujet une éclipse en vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=8N3BzFPf4o4> ou encore <https://www.youtube.com/watch?v=8N3BzFPf4o4>

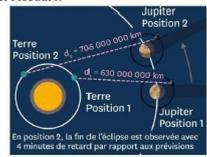
2. Éclipse de Io (= Occultation (= disparition) de Io dans l'ombre de Jupiter.

1

Document 2 Observations de Rømer

En 1676, l'astronome danois Ole Christensen Rømer s'intéresse au problème de Cassini et parvient à apporter une solution pour le résoudre.

À travers son télescope, Rømer, lui aussi, observe Io lorsqu'elle devient visible (même partiellement), à deux dates différentes : août 1676 et novembre 1676. En effet, entre ces deux dates, la distance entre Io et la Terre n'est pas la même :



En août 1676, la distance Terre-Io est d'environ : 630.000.000 de kilomètres.
En novembre 1676, la distance Terre-Io est d'environ : 705.000.000 de kilomètres.

En position 2, la fin de l'éclipse est observée avec 4 minutes de retard par rapport aux prévisions.

Deux fins d'éclipses, à deux dates différentes.

Le scientifique constate qu'en novembre, la lumière du Soleil réfléchi par Io, dans l'espace, met un temps supplémentaire pour arriver sur Terre : ± 4 min.

Document 3 La fibre optique

C'est au XIX^e siècle (en 1840) que la première démonstration scientifique du principe de la fibre optique fut montrée. Durant tout le XX^e siècle, la technologie ne cessa d'évoluer. Aujourd'hui, la technologie de la fibre est incontournable pour répondre à la demande croissante de haut-débit, comme le streaming vidéo (Netflix, Prime Video, Apple TV+, Disney+, ...) qui représente la plus grosse part du trafic de données.

Il est possible d'utiliser un signal lumineux pour transporter une information, entre un émetteur et un récepteur, à travers ce qui s'appelle la « fibre optique ».

La fibre optique est un fil de verre transparent¹ (recouvert par un revêtement protecteur en plastique), qui conduit la lumière. La lumière se propage dans la terre. Grâce à des câbles (pouvant être constitués de fibres optiques) posés au fond des océans, la circulation des informations sur internet² peut se faire entre les continents !



Entre Penmarc'h (commune française située en Bretagne) et Le Cap (ville d'Afrique du Sud, capitale législative du pays), un câble long de 17.000 km relie les deux villes.

Le maire de Penmarc'h envoie un e-mail (courrier électronique) au maire de Le Cap, via la fibre, 0,085 s plus tard, ce dernier l'a bien reçu.

1. Transparent : Laisse passer la lumière.

2

Figure 10. Activité documentaire « Est-ce que la vitesse de la lumière est infinie ? » (1).

Internet : Internet, c'est un réseau mondial qui permet aux ordinateurs du monde entier de communiquer via différents types de liaisons : hertziennes (utilisation des ondes) ou filaires. Pour les liaisons filaires, on peut avoir : soit un câble réseau, soit une fibre optique (débit de transfert de données 8 fois plus rapide qu'un câble réseau).

1. **Doc. 1** - Explique en quoi les observations de Cassini sont un problème pour lui ?

2. **Doc. 2** - Explique en quoi les observations de Romer ont permis de répondre à la question de Cassini sur le caractère infini ou fini de la lumière.

3. **Doc. 3** - Explique en quoi la situation de l'envoi du mail par la fibre, entre Penmarc'h et de Le Cap, permet de dire si la vitesse de la lumière est infinie ou finie.

→ Docs. 1, 2 et 3 - Finalement, que conclure sur la vitesse de la lumière.

→ Cette activité montre que, au cours de l'histoire (docs. 1 et 2), il y a eu un débat sur la vitesse de la lumière. Quel est l'intérêt d'étudier l'histoire des sciences ?

Synthèse collective

Conclusion ! → CE QUE JE RETIENS

La lumière ne se déplace pas instantanément : elle a une vitesse finie (non infinie), elle met donc une certaine durée pour parcourir une distance.

Dans le vide, la vitesse de la lumière est : 299 792 458 m/s.
Cette vitesse est arrondie à : 300 000 000 m/s.

1^{ère} application
Calculer le temps que met la lumière du Soleil pour parvenir à la Terre. Pour cela, compléter le schéma avec la donnée manquante, puis réaliser le calcul à côté.

2^e application
Pourquoi, lors d'un orage, l'éclair est visible avant d'entendre le tonnerre ?

POUR APPROFONDIR

- Pour la lumière, un autre terme peut être employé pour parler de la vitesse de la lumière dans le vide : la **célérité** (célérité de la lumière), notée c .
- D'où : $v_{lumière} = c = 300\,000\,000\text{ m/s}$.
- DISCUSSION : En quelque sorte, observer l'espace, c'est regarder vers le passé !

Figure 11. Activité documentaire « Est-ce que la vitesse de la lumière est infinie ? » (2).

CORRECTION

1. **Doc. 1** - Explique en quoi les observations de Cassini sont un problème pour lui ?
Les éclipses, que Cassini semble connaître, ne respectent pas toujours les horaires qu'il a prévus. Il n'en comprend pas la raison.

2. **Doc. 2** - Explique en quoi les observations de Romer ont permis de répondre à la question de Cassini sur le caractère infini ou fini de la lumière.
Lorsque la lumière parcourt plus de distance, elle met plus de temps à arriver sur Terre.
- Si la vitesse de la lumière est infinie, la lumière doit arriver sur Terre instantanément (peu importe la distance Terre-Io).
- Si la vitesse de la lumière n'est pas infinie, la lumière n'arrive pas sur Terre instantanément : elle met un certain temps qui dépend de la distance d'éloignement (si la distance augmente, le temps augmente aussi).

* La distance entre Io et la Terre est plus grande en novembre (705 000 000 km) qu'en août (635 000 000 km). Or, en novembre (quand Io est plus éloignée), la lumière met plus de temps pour arriver sur Terre (4 min de plus).

3. **Doc. 3** - Explique comment la situation de l'envoi du mail par la fibre, entre Penmarc'h et de Le Cap, permet de dire si la vitesse de la lumière est infinie ou finie.
Il existe un léger décalage (inférieur à 1 s) entre l'envoi du message (en France) et la réception du message (en Afrique du Sud).
- Si la vitesse de la lumière est infinie, la durée de transmission de l'information transportée par la lumière devrait être nulle, ce qui n'est pas le cas (car il existe un délai de réception du message).

→ Doc. 3 - Finalement, que conclure sur la vitesse de la lumière.
La lumière se propage de manière finie : elle a une vitesse qui n'est pas infinie.

→ Cette activité montre que, au cours de l'histoire (docs. 1 et 3), il y a eu un débat sur la vitesse de la lumière. Quel est l'intérêt d'étudier l'histoire des sciences ?

Synthèse collective

Conclusion ! → CE QUE JE RETIENS

La lumière ne se déplace pas instantanément : elle a une vitesse finie (non infinie), elle met donc une certaine durée pour parcourir une distance.

Dans le vide, la vitesse de la lumière est : 299 792 458 m/s.
Cette vitesse est arrondie à : 300 000 000 m/s.

1^{ère} application
Calculer le temps que met la lumière du Soleil pour parvenir à la Terre. Pour cela, compléter le schéma avec la donnée manquante, puis réaliser le calcul à côté.

2^e application
Pourquoi, lors d'un orage, l'éclair est visible avant d'entendre le tonnerre ?

POUR APPROFONDIR

- Pour la lumière, un autre terme peut être employé pour parler de la vitesse de la lumière dans le vide : la **célérité** (célérité de la lumière), notée c .
- D'où : $v_{lumière} = c = 300\,000\,000\text{ m/s}$.
- DISCUSSION : En quelque sorte, observer l'espace, c'est regarder vers le passé !

Figure 12. Activité documentaire « Est-ce que la vitesse de la lumière est infinie ? » (correction).

Au collège *Croix d'Argent*, la vitesse de propagation de la lumière (pareillement pour le son) est étudiée en 5^e, comme ce qui est planifié dans le Nathan. La valeur de la vitesse d'un signal ressort en 4^e (en 3^e pour le son) dans le cadre du calcul de distances dans l'Univers, avec les puissances de dix.

Il est primordial que les élèves assimilent, en premier lieu, le fait que la vitesse de la lumière soit finie. Après quoi, c'est seulement dans le cadre de la fin d'activité que la valeur de la vitesse de la lumière (valeur précise avant de donner la valeur arrondie à apprendre) est renseignée. La situation-contexte conduit à comprendre les écarts temporels constatés et limités aux observations entre la fin de l'éclipse de Io et son observation sur Terre (documents 1 et 2), ou encore à comprendre le délai existant entre l'envoi et la réception d'un message via la fibre optique (document 3). Ce qui est nouveau, dans cette activité, c'est de mettre en avant deux types de situation pour appréhender le fait que la lumière mette un certain temps pour se propager : astronomique mais aussi de la vie quotidienne.

En réaction à la séance, une critique peut être dispensée : la longueur du texte dans chaque document pourrait être réduite.

Finalement, la mise en place de l'activité, prévue pour une séance de 55 minutes, a duré finalement 35 minutes parce qu'une évaluation de 20 minutes, sur le son, était programmée en début d'heure. Pédagogiquement, c'est une activité traditionnelle où les élèves travaillent en autonomie, par binômes, pour réaliser la tâche demandée (production écrite en répondant à des questions qui guident l'élève vers l'objectif répondant à la problématique), tandis que l'enseignant se déplace dans la classe pour apporter de l'aide aux élèves les plus en difficultés, corriger les réponses préliminaires des élèves et pour surveiller la mise au travail. Toujours en tâche élève, les élèves viennent écrire leur réponse au tableau. Le « CE QUE JE RETIENS » de cette activité est complété par l'enseignant en s'appuyant sur l'intervention des élèves en cours dialogué, réalisé 10 minutes au début de la prochaine séance. Le « Pour approfondir » est complété par l'enseignant seul ; le deuxième point d'approfondissement a été abandonné en cours de séance (jugé après trop compliqué). Les 5 minutes qui suivent servent à la trace écrite dans le cours (distribution d'un papier à coller en-dessous du titre).

VI) 2. ii. **Activité documentaire « Quelle est la vitesse de la lumière dans un milieu différent du vide ? »**

La vitesse de propagation de la lumière dans un milieu différent du vide change. L'étude comparative des manuels dresse le constat que des valeurs de vitesse peuvent être données dans d'autres milieux, en cours (transmission du savoir) ou en activités (indication, choix de la valeur de la vitesse de la lumière à considérer dans un milieu donné), mais aucune activité ne permet de réellement déconstruire le contraire. L'exemple le plus parlant se situe entre le vide et l'air : la valeur arrondie de 300.000.000 m/s se retrouve souvent dans les manuels, le fait est que la valeur précise n'est pas la même entre les deux milieux. Par ailleurs, les résultats analysés avec les *pré*-tests montrent que la variance (ou l'invariance) de la vitesse de la lumière en norme n'est pas si évidente, l'influence (erronée) de la source en veut pour preuve majeure : 22,2 % seulement des élèves répondent que la vitesse de la lumière provenant du Soleil est égale à celle provenant de la Lune, 17,8 % que la vitesse de la lumière provenant du Soleil est égale à celle provenant d'une lampe, 22,2 % que la vitesse de la lumière provenant d'une lampe est égale à celle provenant de la flamme d'une bougie.

S'ouvrant par une approche historique, l'activité « Quelle est la vitesse de la lumière dans un milieu différent du vide ? » se veut être précurseur à modéliser la lumière avec la vitesse, intégrée, de manière à prendre en considération l'influence du milieu sur la valeur. Le modèle de la lumière devient le modèle enrichi de la lumière, **Figure 13**. Additionnellement, dans le cours, il est cité : « *La modélisation de la lumière avec intégration de la vitesse (modèle enrichi) n'est pas un standard ! Dès que le concept de vitesse de la lumière est bien compris, il faut s'habituer [en 4^e et en 3^e] à utiliser la modélisation de la lumière sans intégration de la vitesse (par simplification).* » Une position est prise pareillement en activité.

La **Figure 14** et la **Figure 15** (en partie) renvoient à l'activité ; la **Figure 15** (en partie) et la **Figure 16** vers un exemple de correction complète.

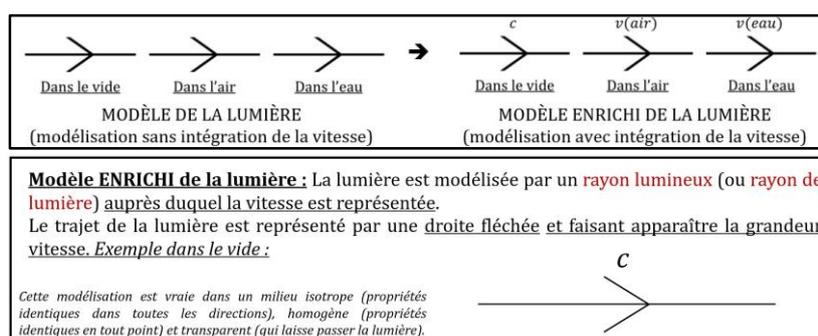


Figure 13. Présentation du modèle enrichi (le cadre du haut est extrait de l'activité qui traite de ce modèle, le cadre du bas est extrait de la présentation du chapitre en classe).

5^e - THÈME : Des signaux pour observer et communiquer
CHAPITRE 2 : Signaux lumineux (5^e)

Activité documentaire **Quelle est la vitesse de la lumière dans un milieu différent du vide ?**

Contexte : Rappels pour le son : Le son est la propagation d'une vibration de la matière. La vitesse du son varie selon le milieu de propagation : 340 m/s (dans l'air), 1.500 m/s (dans l'eau), 5.000 m/s (dans l'acier), ...

Pour la lumière : La lumière, contrairement au son, peut se propager même dans le vide. Il est largement admis que la vitesse de la lumière est de 300.000.000 m/s (299.792.458 m/s plus exactement) dans le vide, mais aussi dans l'air.



Problématique : La lumière peut-elle avoir une vitesse différente de 300.000 km/s ?

Hypothèse(s) : Je pense que ...

Document : **Léon Foucault**
En 1853, le physicien et astronome Léon Foucault (1819-1868) publie sa thèse de doctorat intitulée *Sur les vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau*. Dans cette thèse, il effectue des mesures de la vitesse de la lumière, dans l'air comme dans l'eau, à l'aide d'un dispositif expérimental appelé *appareil de Fizeau-Foucault* (du nom du physicien et astronome français Hippolyte Fizeau (1819-1896) qui le développa en premier, Foucault apportera des modifications). Le principe de l'expérience est compliqué (miroir sphérique tournant, différents parcours de la lumière, ...) et du niveau lycée, et aura été revu par Foucault lui-même (utilisation de plusieurs miroirs) pour améliorer la technique. Ce qu'il est important de retenir ici, ce sont ses derniers résultats :

$v_{lumière(air)} = 298.000 \text{ km/s}$
 $v_{lumière(eau)} = 225.400 \text{ km/s}$

Aujourd'hui, les valeurs exactes sont les suivantes :
 $v_{lumière(air)} = 299.705 \text{ km/s} \sim 300.000 \text{ km/s}$
 $v_{lumière(eau)} = 224.901 \text{ km/s} \sim 225.000 \text{ km/s}$

1. Rappeler la vitesse du son dans l'air et dans l'eau ?
Comparer et conclure.

2. Énoncer la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau ?
Comparer et conclure.

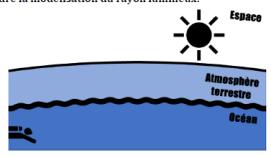
3. Dessiner le modèle de la lumière.

4. Ci-dessous, on complète trois modèles de rayons lumineux en fonction du milieu de propagation.
Compléter les modèles en intégrant la vitesse.

5. Ci-après, de manière simplifiée, la lumière du Soleil arrive jusqu'à un nageur. La modélisation du rayon lumineux semble-t-elle complète ? Quelle information pourrait manquer ?

Figure 14. Activité documentaire « Quelle est la vitesse de la lumière dans un milieu différent du vide ? » (1).

6. Reprendre la modélisation du rayon lumineux.



Synthèse collective

Conclusion	→ CE QUE JE RETIENS
La vitesse de la lumière dépend du ...	<ul style="list-style-type: none"> Dans le vide : $c = \dots \text{ m/s} \otimes \dots \text{ m/s}$. Dans l'air (gaz) : $v(\text{air}) = \dots \text{ m/s} \otimes \dots \text{ m/s}$. Dans l'eau (liquide) : $v(\text{eau}) = \dots \text{ m/s} \otimes \dots \text{ m/s}$.
Le modèle du rayon lumineux rend compte de ... et ... mais pas de ... Il est donc intéressant de modifier le modèle, en le complétant par l'incorporation de ... tel que :	
Toutefois, le modèle enrichi de la lumière n'est pas un standard ! Dès que le concept de vitesse de la lumière est bien compris, il faut s'habituer à utiliser la modélisation « classique » de la lumière, sans intégration de la vitesse (par simplification).	

POUR APPROFONDIR
Selon quel scientifique (1879-1955), rien ne peut aller plus vite que la lumière ?

CORRECTION

1. Rappeler la vitesse du son dans l'air et dans l'eau ?
Comparer et conclure.
 v_{son} dans l'air : 340 m/s.
 v_{son} dans l'eau : 1500 m/s.
 v_{son} dans l'eau (liquide) > v_{son} dans l'air (gaz) : le son se propage plus vite dans un liquide que dans un gaz.

2. Énoncer la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau ?
Comparer et conclure.
 $v_{lumière}$ dans l'air : 300.000 km/s.
 $v_{lumière}$ dans l'eau : 225.000 km/s.
 $v_{lumière}$ dans l'air (gaz) > $v_{lumière}$ dans l'eau (liquide) : la lumière se propage plus vite dans un gaz que dans un liquide.

3. Dessiner le modèle de la lumière.

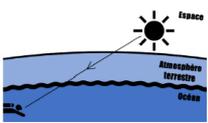
4. Ci-dessous, on complète trois modèles de rayons lumineux en fonction du milieu de propagation.
Compléter les modèles en intégrant la vitesse.

5. Ci-après, de manière simplifiée, la lumière du Soleil arrive jusqu'à un nageur. La modélisation du rayon lumineux semble-t-elle complète ? Quelle information pourrait manquer ?

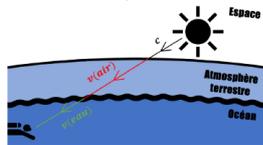
Figure 15. Activité documentaire « Quelle est la vitesse de la lumière dans un milieu différent du vide ? » (2 et début de correction).

• Non, car la vitesse de la lumière change selon le milieu dans lequel elle se propage (espace, atmosphère, océan).

• Il manquerait la vitesse du rayon dans le milieu correspondant.



6. Reprendre la modélisation du rayon lumineux.



Synthèse collective

Conclusion	→ CE QUE JE RETIENS
↓	
	<p>La vitesse de la lumière dépend du milieu de propagation.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dans le vide : $c = 299\,792\,458\text{ m/s} \approx 300\,000\,000\text{ m/s}$. - Dans l'air (gaz) : $v(\text{air}) = 299\,704\,645\text{ m/s} \approx 300\,000\,000\text{ m/s}$. - Dans l'eau (liquide) : $v(\text{eau}) = 224\,900\,569\text{ m/s} = 225\,000\,000\text{ m/s}$. <p>Le modèle du rayon lumineux rend compte de la trajectoire et du sens mais pas de la vitesse. Il est donc intéressant de modifier le modèle, en le complétant par l'incorporation de la vitesse, tel que :</p>
	
	<p>MODÈLE DE LA LUMIÈRE (modélisation sans intégration de la vitesse)</p> <p>MODÈLE ENRICHIS DE LA LUMIÈRE (modélisation avec intégration de la vitesse)</p>
	<p>Toutefois, le modèle enrichi de la lumière n'est pas un standard !</p>

Dès que le concept de vitesse de la lumière est bien compris, il faut s'habituer à utiliser la modélisation « classique » de la lumière, sans intégration de la vitesse (par simplification).

 POUR APPROFONDIR

Selon quel scientifique (1879-1955), rien ne peut aller plus vite que la lumière ?

Selon Albert Einstein, physicien théoricien.

Figure 16. Activité documentaire « Quelle est la vitesse de la lumière dans un milieu différent du vide ? » (3 et fin de correction).

Dans les questions 5 et 6, la réfraction de la lumière (déviation de la propagation de la lumière lorsqu'elle change de milieu en traversant un dioptre) devrait avoir lieu. Typiquement, l'indice de réfraction de l'eau (1,33) étant supérieur à celui de l'air (~ 1), le passage de la lumière à l'interface air-eau correspond au passage d'un milieu moins convergent à un milieu plus convergent. En entrant dans le milieu de l'eau, le rayon de lumière devrait se rapprocher de la droite normale selon la 2^e loi de la réfraction de Snell-Descartes. Cette réfraction est négligée dans ces questions pour des élèves de 5^e (comme de 4^e et de 3^e car non exigible dans les connaissances et compétences associées aux signaux lumineux, même si la réfraction de la lumière, par une lentille par exemple, peut être étudiée (manuel de Nathan de cycle 4, manuel de Nathan de 3^e)).

Le passage de la question 5 à la question 6, équivalent à la transition entre le modèle et le modèle enrichi de la lumière, est administré. Le changement de couleur du rayon de lumière dans chaque milieu insiste sur l'influence du milieu dans la modélisation et sur la valeur de la vitesse de la lumière.

Le cœur de l'activité stipulant que la vitesse de la lumière dépende du milieu, les élèves doivent concrétiser le fait que la dépendance vis-à-vis de la source de lumière ne compte pas, que

cette source la produise ou la diffuse. À la suite de cette activité, pour dépasser cette conception erronée, dans une sorte de « CE QUE JE RETIENS AUSSI », les élèves notent donc la trace écrite s'accordant sur le fait que « *la vitesse de la lumière ne dépend pas de la source (source primaire, objet diffusant). En particulier : la vitesse de la lumière provenant du Soleil est la même que celle provenant de la Lune, ou d'une lampe, et ainsi de suite.* »

En réaction à la séance, une critique peut être dispensée : la même que pour la précédente activité.

Finalement, la mise en place de l'activité, prévue pour une séance de 55 minutes, a duré finalement 40 minutes parce que l'activité précédente (« Est-ce que la vitesse de la lumière est infinie ? ») a été terminée lors du premier quart d'heure. La modalité pédagogique n'est pas identique à l'activité précédente : l'activité a été conduite, dans sa totalité, en cours dialogué, laissant moins d'indépendance aux élèves pour travailler l'activité, en raison de la difficulté multiple de transmission, d'appropriation et de relation avec ce modèle optique inédit. Il est, malgré tout, demandé à un élève de faire la dernière question (question 6.) au tableau. Cette question remet en cause le modèle de la lumière, il est important de marquer le moment. Environ 5 minutes avant la fin de l'heure, le « CE QUE JE RETIENS » et le « Pour approfondir » concluent la séance. Pour la prochaine séance (début d'heure sur environ 15 minutes), un rappel sera effectué avant une phase d'institutionnalisation (coller le papier du modèle enrichi dans le cours ; écriture manuscrite de la dépendance de la vitesse de la lumière au milieu et son indépendance de la source lumineuse). Cette phase est d'autant plus importante qu'elle ajoute un changement au modèle de la lumière vu jusqu'ici.

VI) 3. Évaluation sommative et analyse *post-test* pour la construction d'un modèle

VI) 3. i. Évaluation sommative pour la construction d'un modèle (présentation)

Une partie de l'évaluation sommative est intégrée dans la **Figure 17**. Le sujet complet est en *annexe X) 15*. L'évaluation comporte deux parties :

- Une partie de restitution de connaissances du cours : « Exercice introductif : Restitution de connaissances du cours » pour travailler la compétence transversale du même nom.
- Une partie d'application de connaissances du cours : « EXERCICE 1 : Mesure historique de la vitesse de la lumière par Hippolyte Fizeau en 1849 » pour travailler la compétence

Pratiquer le calcul numérique (exact et approché) et le calcul littéral du domaine 4 du Socle Commun de Connaissances, de Compétences et de Culture de 2015 (autre compétence possible mais non évaluée : Lire et comprendre des documents scientifiques pour en extraire des informations du domaine D4) ; « EXERCICE 2 : Chez le photographe : prise de photo dans différentes conditions » pour la compétence Modéliser et représenter des phénomènes et des objets du domaine D4.

Pour l'exercice 1 de l'évaluation, les élèves doivent extraire une distance et un temps d'un document texte et d'un document image puis formuler le calcul d'une vitesse avant de pratiquer le calcul numérique et d'exprimer le résultat dans une unité adaptée (peut être évalué en domaine D1.3). Cet exercice est tiré du manuel Physique-Chimie Cycle 4 de l'éditeur Nathan (manuels de 5^e et de 4^e) dans lequel des questions intermédiaires sont ajoutées pour aider à la résolution. Pour l'exercice 2 de l'évaluation, les élèves doivent modéliser la lumière en utilisant le modèle du rayon lumineux pour expliquer la vision d'un objet capturée par un appareil photo. Cet exercice est tiré du manuel Physique-Chimie Cycle 4 de l'éditeur Lelivrescolaire.fr (manuel de 5^e) dans lequel des situations intermédiaires sont ajoutées pour aider à la résolution. Après le temps d'évaluation, une correction de l'enseignant (annexe X) 16) est distribuée, à ranger en fin de chapitre.

T	C
T1 **	<p>Exercice introductif : Restitution de connaissances du cours</p> <p>1) Définir une source primaire de lumière. <i>Donner un exemple.</i></p> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>
T1 **	<p>2) Définir un objet diffusant. <i>Donner un exemple.</i></p> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>
T1 *	<p>3) Dessiner le modèle du rayon lumineux.</p> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>
T1 *	<p>4) Quelle est la situation qui explique correctement le phénomène de la vision avec le modèle du rayon lumineux ?</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>

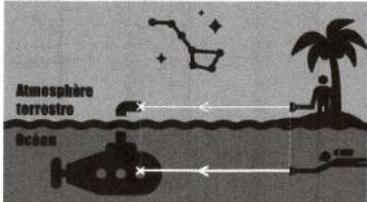
T1 *	<p>5) Quelle est la situation qui explique correctement le phénomène de la vision avec le modèle du rayon lumineux ?</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">    </div>
T1 **	<p>6) Donner la vitesse de propagation de la lumière dans le vide. <i>(Pour avoir tous les points, ne pas oublier l'unité.)</i></p> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>
T1 *	<p>7) La vitesse de propagation de la lumière dépend-elle du milieu dans lequel elle se propage ?</p> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>
T1 **	<p>8) En observant l'image suivante : Les deux rayons arrivent-ils sur leur crois au même moment ? Pourquoi ?</p> <p><input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non.</p> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>
T1 **	<p>9) En médiant l'image précédente : Ajouter/intégrer le paramètre de la vitesse de la lumière sur les deux rayons lumineux, en utilisant le modèle enrichi de la lumière.</p> <div style="text-align: center;">  </div>

Figure 17. Les signaux lumineux, extrait de l'évaluation.

Dans l'exercice introductif, les dernières questions de cette partie sont en lien avec ce qui a été mis en place par rapport au modèle enrichi de ce mémoire. Dans les questions 6 et 7, il faut donner la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide (6) et d'indiquer si cette valeur de vitesse change selon le milieu de propagation (7). Dans les questions 8 et 9, les élèves doivent travailler sur une image qui va servir à appliquer le modèle enrichi de la lumière. Il faut répondre par oui ou par non, dans la question 8, si deux rayons lumineux arrivent en même temps à une position marquée d'une croix sur une image, avant de justifier. La justification repose sur le fait que les deux rayons ne se propagent pas dans le même milieu (l'un dans l'air, l'autre dans l'eau). Il est ensuite demandé, en question 9, d'ajouter le paramètre vitesse auprès de chacun des rayons lumineux (écriture du modèle enrichi).

VI) 3. ii. Évaluation sommative pour la construction d'un modèle (résultats)

- Résultats en général

Avant d'aller plus loin, il convient de préciser ce qui suit sur les résultats globaux. Étant donné le niveau différent entre les deux classes (du moins, dans les résultats aux évaluations), les chiffres sont donnés pour chacune d'entre elles avant d'être moyennés.

Les résultats chiffrés de l'évaluation sur les signaux lumineux sont hétérogènes, calculés dans le **Tableau 8** (sans considérer l'auto-correction). Les résultats par compétences, sur quatre niveaux (très bonne maîtrise, maîtrise satisfaisante, maîtrise fragile, maîtrise insuffisante) sont rentrés dans un logiciel (Pronote) mais ne seront pas plus détaillés ici. Sur cette évaluation, 22 élèves étaient présents dans chaque classe ($n = 44$).

Classe	5 ^e 5	5 ^e 6	5 ^e 5 – 5 ^e 6
Moyenne en « Connaissances » (/14)	8,18	10,55	9,39
Moyenne dans la « Compétence 1 » (/6)	1,18	1,23	1,21
Moyenne dans la « Compétence 2 » (/6)	2,14	3,09	2,62
Moyenne sur le sujet (/26)	11,50	14,81	13,18
Moyenne sur le sujet (/20)	8,85	11,39	10,14
± Écart-type expérimental (/20)	± 4,62	± 4,31	± 4,47
Note min. (/20) – Note max. (/20)	0,77 – 16,15	2,31 – 19,23	1,54 – 17,69

Tableau 8. Données statistiques de l'évaluation sur les signaux lumineux pour les deux classes de 5^e.

- « Quel niveau de difficulté donnes-tu à ce sujet ? » : « Facile » = 4,5 % (0,0 % en 5e 5 et 9,1 % en 5e 6) ; « Normal »

= 45,5 % (31,8 % en 5e 5 et 51,9 % en 5e 6) ; « Difficile » = 4,5 % (31,8 % en 5e 5 et 13,6 % en 5e 6) ; avec 27,3 % (36,4 % en 5e 5 et 18,2 % en 5e 6) qui n'ont pas répondu.
 - « As-tu révisé le chapitre lié à ce sujet ? » : « Oui » = 54,5 % (40,9 % en 5e 5 et 68,2 % en 5e 6) ; « Non » = 4,5 % (4,5 % en 5e 5 et 4,5 % en 5e 6) ; avec 40,9 % (54,5 % en 5e 5 et 27,3 % en 5e 6) qui n'ont pas répondu.

- Résultats par rapport à la problématique

Les taux de bonnes et de mauvaises réponses aux questions 3 (modèle de la lumière) et 6 (valeur de la vitesse de la lumière) sont visibles dans la **Figure 18**. En fin de chapitre et le jour où ils sont évalués, en moyenne, la majorité des élèves (> 80 %) maîtrise le modèle du rayon tandis qu'une bonne majorité (> 70 %) connaît la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide.

Dans la **Figure 19** (question 7), l'idée de dépendance de la vitesse de la lumière selon le milieu de propagation a bien été assimilée par les élèves (pourcentage > 80). Dans la **Figure 20** (question 8), appliquant ce principe à l'observation d'une image (deux rayons lumineux issus d'une lampe se propageant dans deux milieux différents), un plus grand nombre d'élève semblent avoir des difficultés de raisonnement : bien que la question soit similaire à la précédente, l'application de la dépendance de la lumière en fonction du milieu voit un nombre d'élèves répondant correctement décroître (pourcentage autour de 60 – 70 qui diffère entre les deux classes : 59,1 % en 5^e 5, 72,7 % en 5^e 6).

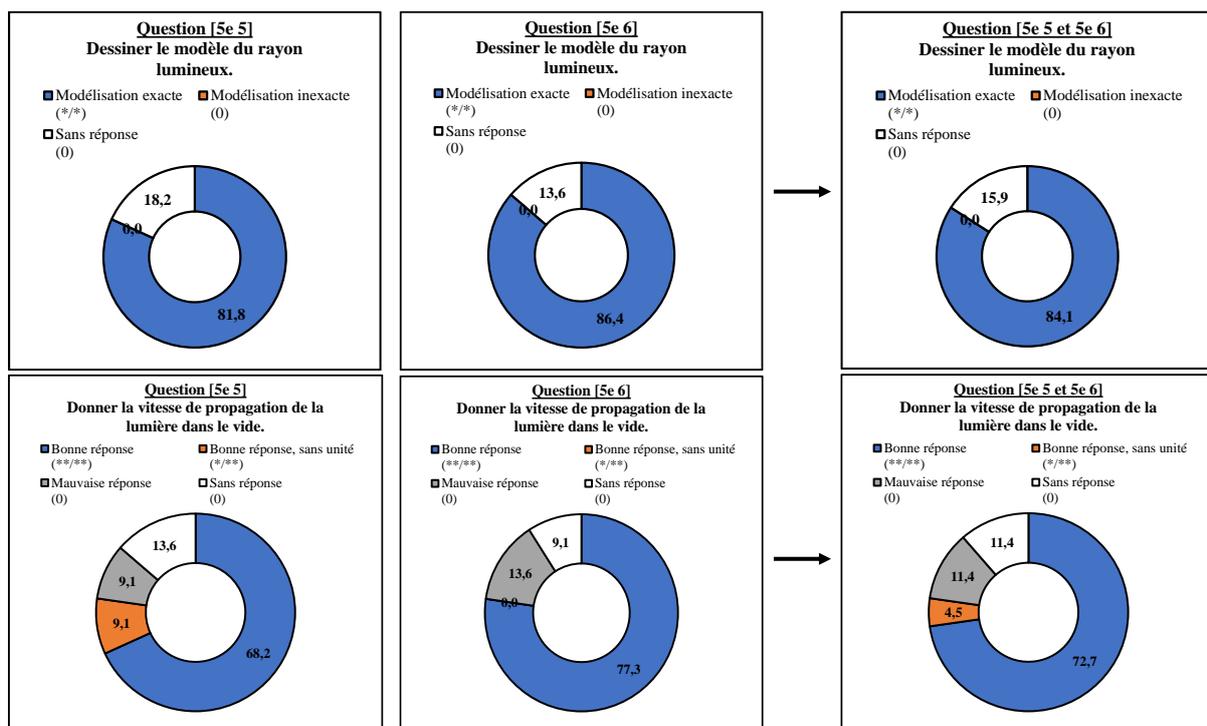


Figure 18. Statistiques sur le modèle et sur la valeur de la vitesse de la lumière en évaluation (n = 44). Dans les graphiques, les 0 correspondent à aucun point attribué à la question.

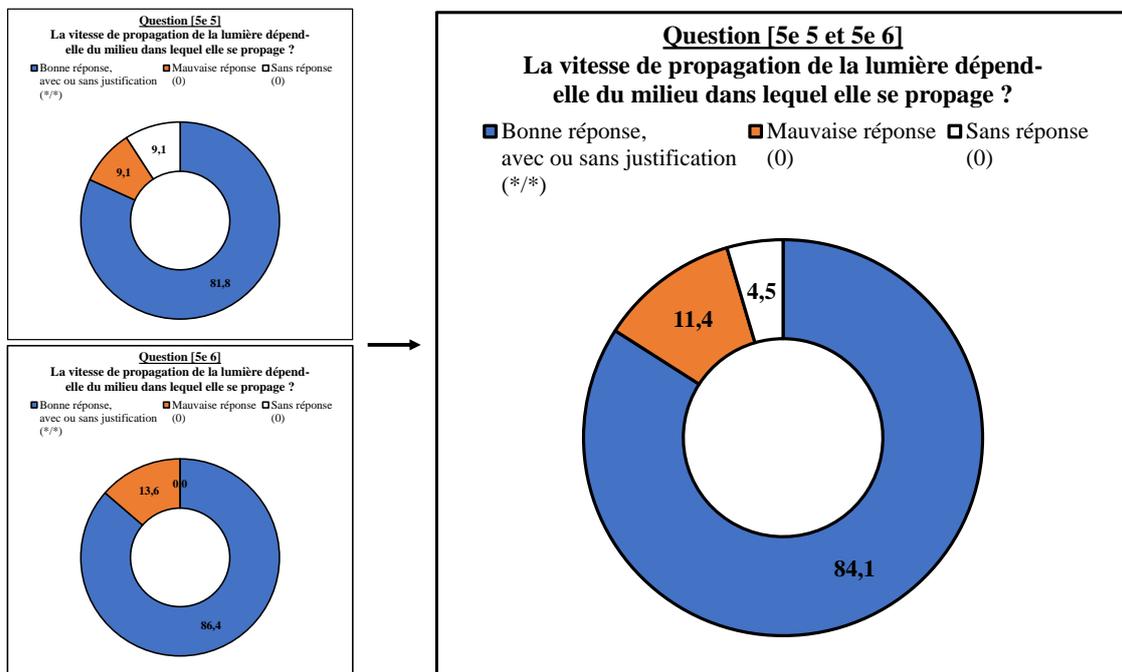


Figure 19. Statistiques de la question : « La vitesse de propagation de la lumière dépend-elle du milieu dans lequel elle se propage ? » (n = 44).

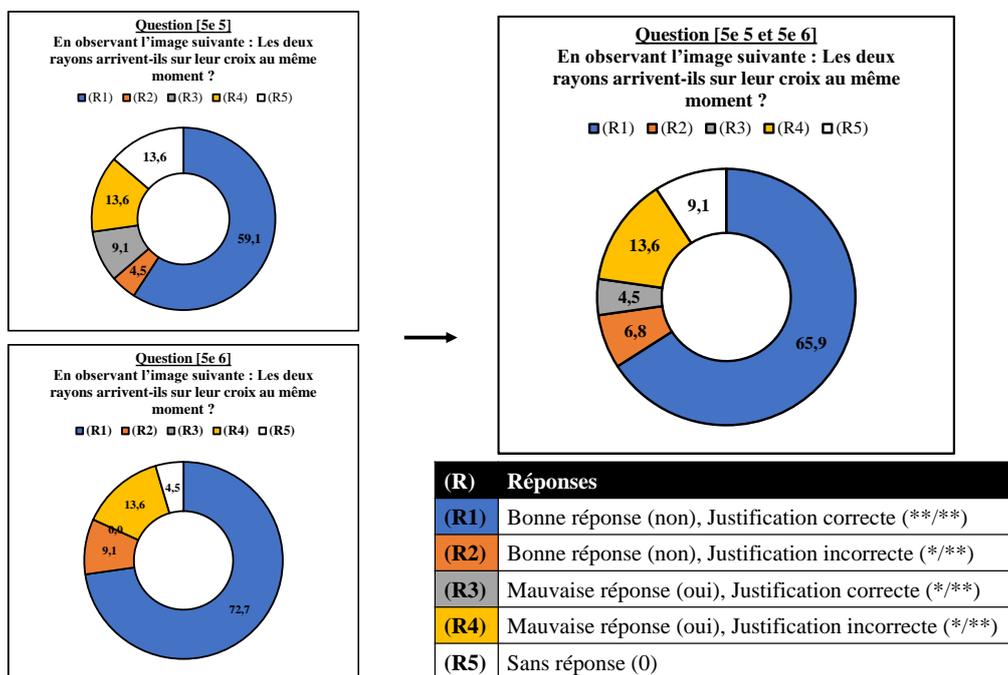


Figure 20. Statistiques de la question : « En observant l'image suivante : Les deux rayons arrivent-ils sur leur croix au même moment ? » (n = 44).

La modélisation reposant sur le modèle enrichi, c'est-à-dire en ajoutant le paramètre de la vitesse ($v(\text{air})$ sur le rayon lumineux dans l'air, $v(\text{eau})$ sur le rayon lumineux dans l'eau), est l'objectif de la dernière question (question 9). Il existe toujours une disparité des réponses entre les

deux classes : jusqu'à 54,5 % des élèves ne tentent pas la question en 5^e 5 contre 31,8 % en 5^e 6. Peut-être que la formulation de la question n'était pas claire. Autrement, près d'un élève sur deux (45,5 % en moyenne entre la 5^e 5 et la 5^e 6, **Figure 21**) modélise correctement la lumière avec le modèle enrichi.

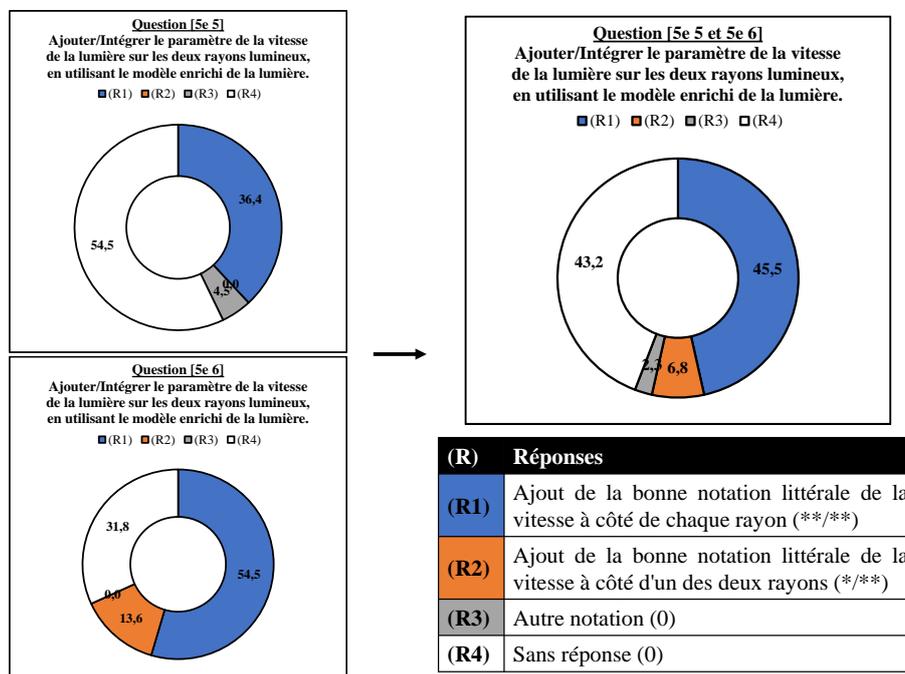


Figure 21. Statistiques de la question : « Ajouter/Intégrer le paramètre de la vitesse de la lumière sur les deux rayons lumineux, en utilisant le modèle enrichi de la lumière. » (n = 44).

VI) 3. iii. Analyse post-test (présentation)

Les questions du *post-test* sont divisées en cinq parties. Le sujet complet du test est en *annexe X) 15*. Les quatre premières parties sont identiques au *pré-test*. La cinquième partie, nouvelle et visible dans la **Figure 22**, consiste à apprécier le degré d'assimilation du modèle enrichi de la lumière. Les écarts de temps étant perceptibles à des échelles astronomiques (intérêt du modèle enrichi dans des situations où la lumière se propage dans l'espace sur des distances très grandes devant celles rencontrées dans la vie courante), des exemples appliqués avec le Soleil (espace) et avec la flamme d'une bougie (vie courante) sont mis en avant. Une correction est proposée, *annexe X) 16*.

Les *post-tests* sont distribués à la fin du chapitre sur la lumière qui clôture le thème 4, juste après l'évaluation sommative. Le test a été distribué environ 15 à 20 minutes avant la fin de l'heure, avec explication des consignes, ce qui n'était pas assez car peu d'élèves ont réussi à finir le *post-test*

(en cours de test, il a été demandé de sauter des questions pour passer et compléter la partie 5). Il fut pourtant difficile d'accorder plus de temps en raison du temps d'évaluation qui précédait le test.

→ **Modélisation de la lumière (application) :**
 Dans chaque situation, représenter la lumière, de la source primaire à l'œil, avec le modèle que tu veux (modèle « classique » ou modèle enrichi).

Partie 5

→ **Modélisation de la lumière :** Représenter la lumière, **SOIT** avec le modèle du rayon lumineux, **SOIT** avec le modèle enrichi du rayon lumineux.

→ **Modélisation de la lumière :** Représenter la lumière *dans le vide*, **SOIT** avec le modèle du rayon lumineux, **SOIT** avec le modèle enrichi du rayon lumineux.

Dans cette situation 2, la lumière provenant du Soleil et la lumière provenant de la flamme arrivent-elles en même temps vers l'œil ?
 Oui. Non.
 Pourquoi ?

Dans cette situation 3, la lumière provenant du Soleil et la lumière provenant de la flamme arrivent-elles en même temps vers l'œil ?
 Oui. Non.
 Pourquoi ?

Figure 22. Post-test, extraits.

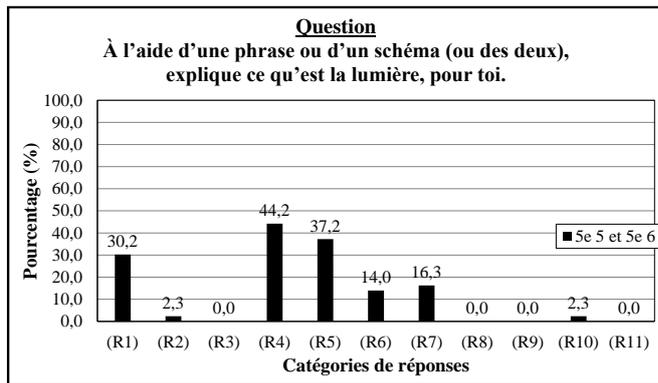
- Pour les 5^e 5, sur 23 élèves (nouvel arrivant découvrant la lumière), un absent et une copie non-rendue (donc 21 copies).
- Pour les 5^e 6 GR1, sur 12 élèves, 2 absents (donc 10 copies). Pour les 5^e 6 GR2, sur 14 élèves, 2 absents (donc 12 copies).

Semblablement aux *pré*-tests, lorsque les résultats sont similaires entre les deux classes, les pourcentages sont moyennés entre les deux. Lorsque les résultats ne sont pas similaires, les pourcentages sont retranscrits pour chacune d'entre elles avant d'être moyennés. Le nombre de copies, noté *n*, est de 43.

VI) 3. iv. Analyse post-test (résultats)

- Partie 1

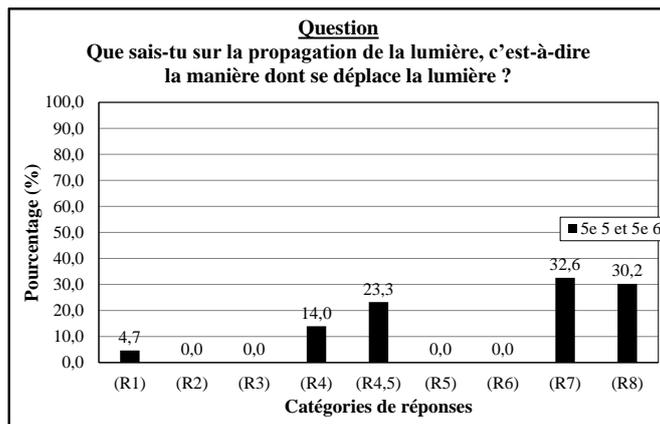
Concernant le *post*-test, les résultats de la partie 1 sont affichés et développés. Les pourcentages d'augmentation (+) ou de diminution (-) par rapport au *post*-test sont également présentés dans la **Figure 23** et dans la **Figure 24**.



Réponse textuelle	Réponse schématisée	Réponse textuelle et schématisée	Sans réponse, « ne sait pas »
44,2 %	11,6 %	16,3 %	25,6 %
- 26,9 %	+ 4,9 %	- 3,7 %	+ 16,7 %

(R)	Réponses	
(R1)	Lumière (appel au modèle)	+ 28,0 %
(R2)	Lumière (appel à l'énergie)	- 15,5 %
(R3)	Lumière (appel au signal)	- 2,2 %
(R4)	Lumière = source (définie ou non définie, ...)	+ 19,8 %
(R5)	Lumière = effets (vision (yeux, phénomènes sur les yeux, "ça sert à voir", ...))	+ 17,2 %
(R6)	Lumière = entité (onde, "quelque-chose", ...)	- 3,8 %
(R7)	La lumière, ça éclaire/illumine	- 37,0 %
(R8)	Électricité	- 6,7 %
(R9)	Confrontation lumière et "noir" ou "ombre"	- 15,6 %
(R10)	Schématisation : ampoule, lampe	- 15,5 %
(R11)	Autre... (vitesse, couleur, projection, chaleur, ...)	- 17,8 %

Figure 23. Statistiques post-test de la première question (n = 43).



(R1)	(R2)	(R3)	(R4)	(R5)	(R6)	(R7)	(R8)
- 8,6 %	- 17,8 %	- 2,2 %	+ 9,6 %	- 6,7 %	- 6,7 %	- 11,8 %	+ 14,6 %
				(R4,5)	+ 23,3 %		

Par rapport au pré-test.

(R)	Réponses
(R1)	Information sur la trajectoire (horizontale, toutes les directions)
(R2)	Information sur la vitesse (rapide)
(R3)	Information sur la vitesse (lente ou inférieure au son)
(R4)	Information sur la vitesse (valeur constante)
(R4,5)	Information sur la vitesse (valeurs dans différents milieux) (dépendance du milieu)
(R5)	Immobile, ne se déplace pas
(R6)	Schématisation circuit électrique (normalisé ou non)
(R7)	Sans réponse, "ne sait pas"
(R8)	Autre...

Figure 24. Statistiques post-test de la deuxième question (n = 43).

Discussion : Presque un élève sur trois (30,2 %, soit + 28,0 %) définit, à présent, la lumière par son modèle, les réponses textuelles (et textuelles et schématisées) ont d'ailleurs diminué entre le pré-test et le post-test (-26,9 % (et -3,7 %)) tandis que les réponses schématisées ont progressé (+ 4,9 %), laissant place au schéma du rayon lumineux. Il est intéressant de constater que les réponses de

type « ça éclaire » ou « ça illumine » ont diminué (53,3 % → 16,3 %, soit -37,0 %). La séquence sur la lumière ayant été axée, en partie, sur le principe de la vision et sur la définition des sources de lumière (source primaire, objet diffusant), ces catégories de réponse ont vu une croissance respective de + 17,2 % et de + 19,8 %. Au sujet de la propagation de la lumière, le nombre d'élèves n'ayant pas répondu a diminué (- 11,8 %) donc les élèves ont une meilleure appréhension de la propagation de la lumière, même si le nombre de réponse « Autre » a progressé de + 14,6 % (là, la propagation de la lumière est encore expliquée en fonction du modèle du rayon ou de sa source). Ce qui est intéressant, d'une part, c'est de relever que 14,0 % (+ 9,6 %) des élèves définissent la propagation de la lumière par sa vitesse finie (caractère fini, 300 000 000 m/s dans le vide), et d'autre part, que 23,3 % (nouvelle catégorie de réponse par rapport au *pré*-test) parlent de vitesse en fonction du milieu, soit en donnant des valeurs de vitesse dans d'autres milieu (225 000 000 m/s dans l'eau par exemple), soit en indiquant seulement que cette dépendance existe. Plus d'un élève sur trois se sert donc de la vitesse. Le fait d'accentuer l'enseignement de la vitesse, notamment par la présence de deux activités portant sur la vitesse finie de la lumière et sur la valeur de la vitesse de la lumière qui change selon le milieu de propagation, peut être une explication. Alors qu'il y a un accroissement net des élèves faisant appel à la vitesse (14,0 + 23,3 = 37,3 %, + (9,6 + 23,3) = + 32,9 %), le taux d'élèves faisant appel à la trajectoire, lui, a décliné (4,7 %, - 8,6 %). Il ne faut pas oublier que, dans les formulations, les pourcentages sont calculés sur 43 élèves donc sur les deux classes.

- Partie 2

Les résultats de la partie 2 sont affichés et développés (**Figure 25** et **Figure 26**). Les pourcentages d'augmentation (+) ou de diminution (-) par rapport au *post*-test sont déduits. Les résultats entre les deux classes de 5^e 5 et de 5^e 6 étant très différents pour cette partie (beaucoup plus échouent en 5^e 5 qu'en 5^e 6), les résultats sont retranscrits pour les deux classes séparément (**Figure 25**) avant d'être rassemblés (**Figure 26**).

Discussion : Après la séquence et l'évaluation (non notée) du *post*-test, plus que 11,6 % des élèves considèrent la vitesse de la lumière comme infinie, 9,3 % ne savent toujours pas trancher entre le caractère fini et infini. En somme, 20,9 % des élèves ne savent pas que la lumière à une vitesse finie à la fin de l'entrée du cycle 4 en 5^e (c'est 23,5 % de moins que lors du *pré*-test).

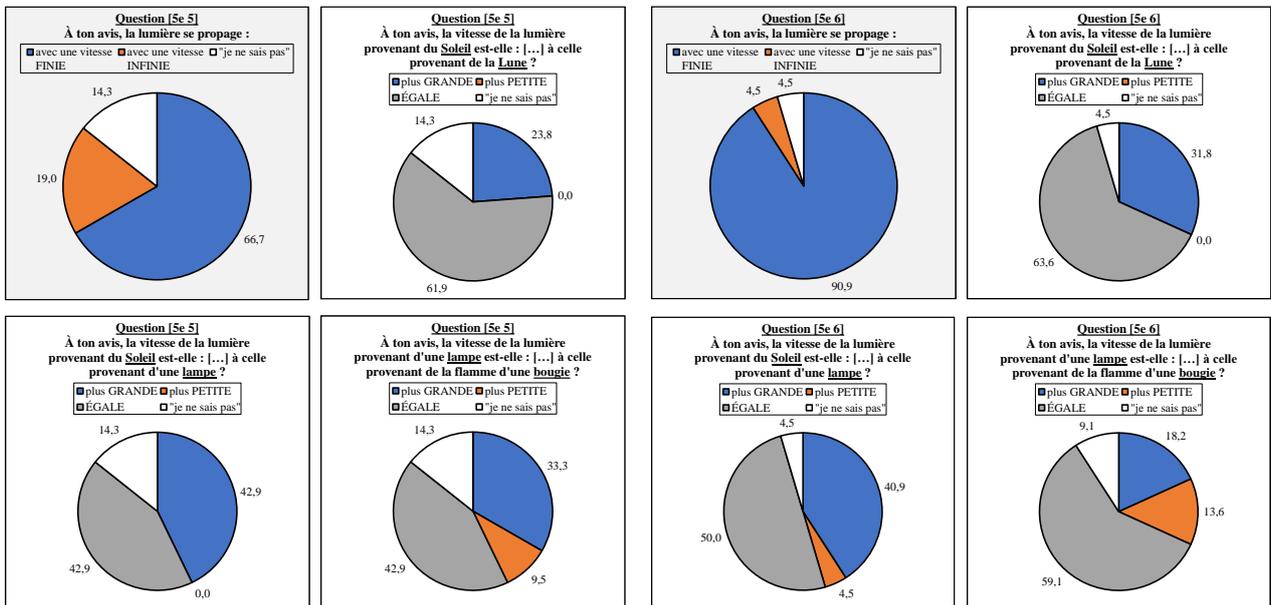


Figure 25. Statistiques post-test des questions de la partie 2 pour les deux 5^e (n = 43) : (à gauche) 5^e 5, (à droite) 5^e 6.

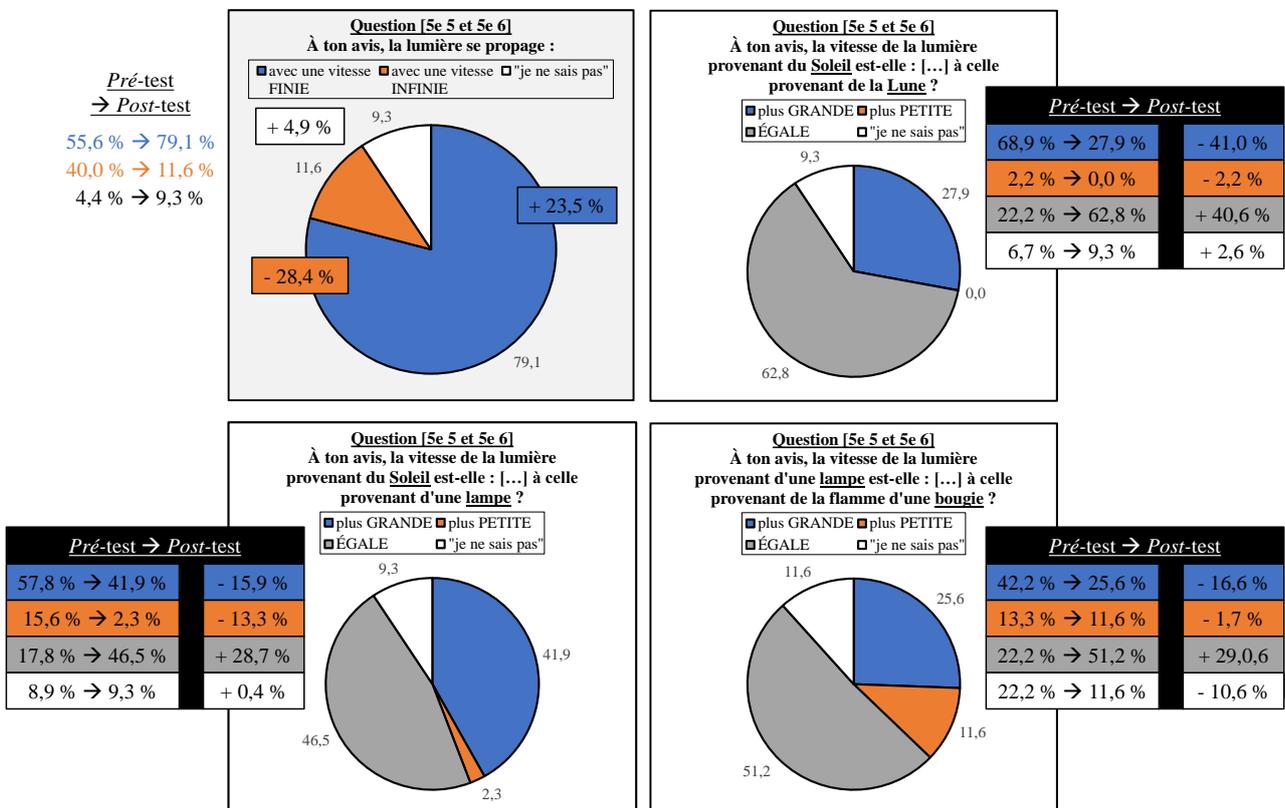


Figure 26. Statistiques post-test des questions de la partie 2 (n = 43).

L'influence de la source sur la vitesse de la lumière est toujours visible, mais les bonnes réponses sont bien plus nombreuses lors du *post-test* que lors du *pré-test* : la vitesse de la lumière est « ÉGALE », peu importe la source dont elle provient (Soleil, Lune, lampe, bougie) pour 62,8 % pour la comparaison Soleil – Lune, 46,5 % pour la comparaison Soleil – lampe, 51,2 % pour la

comparaison lampe – flamme. Tout comme le *pré*-test, le taux de « ÉGALE » est le plus bas au sujet de la comparaison entre le Soleil et la lampe, là où le plus gros écart de puissance existe. Il semble y avoir une corrélation, pour les élèves, entre la puissance de la source et la vitesse de la lumière produite ou diffusée. En dépit de la séquence enseignée aux élèves et précisant que la vitesse de la lumière ne dépend que du milieu de propagation, la conception erronée d'une dépendance en fonction de la source de lumière reste solidement ancrée. Tout au long du cycle 4, pour les années scolaires suivantes (en 4^e et en 3^e), ce point exige d'être travaillé et retravaillé, la dépendance seule (à ce niveau) de la vitesse de la lumière par rapport au milieu de propagation doit être répétée et répétée, voire construire d'autres activités. Dans cette éventualité, une activité intégrant un débat historique pour expliquer des phénomènes en fonction de la vitesse de la lumière pourrait être envisagé (dans l'activité « Est-ce que la vitesse de la lumière est infinie », le débat historique du problème de Cassini n'était potentiellement pas assez poussé).

- Partie 3

Les résultats de la partie 3 sont affichés et développés (**Figure 27**). Les pourcentages d'augmentation (+) ou de diminution (-) par rapport au *post*-test, sur les deux classes regroupées (5^e 5 et 5^e 6), sont déduits.

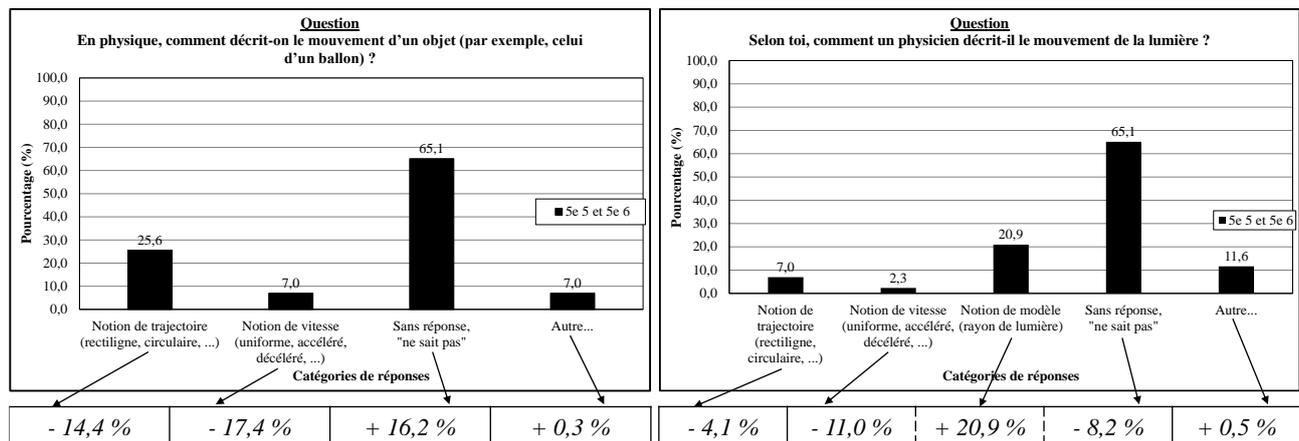


Figure 27. Statistiques post-test des questions de la partie 3 (n = 43).

Discussion : Alors que 64,4 % des élèves utilisaient des notions de « trajectoire » et de « vitesse » pour décrire un mouvement matériel lors du *pré*-test, lors du *post*-test, ils ne sont plus que 32,6 %, une baisse de - 31,8 %. Alors que ce nombre était de 24,4 % pour décrire le mouvement de la lumière lors du *pré*-test, lors du *post*-test, il tombe à 9,3 %, une baisse de 15,1 %. Plusieurs

explications sont possibles : le thème sur le mouvement matériel (« Mouvement et interactions ») est encore plus éloigné dans le temps donc les notions vues dans ce thème sont de plus en plus oubliées ; le fort pourcentage d'élèves qui s'abstient de répondre (respectivement 65,1 % et 65,1 %). Ces explications sont même, sans doute, complémentaires. En se focalisant sur le mouvement de la lumière, une autre explication s'ajoute aux précédentes dans une nouvelle catégorie de réponse, puisque 20,9 % des élèves décrivent son mouvement en se servant du modèle de la lumière (rayon de lumière schématisé ou textualisé). Dans « Autre », même, le mouvement peut être décrit comme dépendant du milieu.

L'origine du pourcentage d'abstention provient certainement du fait que les élèves ont sauté cette partie par manque de temps ; il leur a en effet été conseillé de passer à la suite (en particulier la partie 5) pour avancer. Du coup, les résultats s'avèrent non interprétables.

- Partie 4

Les résultats de la partie 4 sont affichés et développés (**Tableau 9**, **Tableau 10**, **Tableau 11**). Les pourcentages d'augmentation (+) ou de diminution (-) par rapport au *post*-test sont déduits.

Question : À l'aide d'une phrase et/ou d'un schéma (en traçant sur l'image), explique comment la personne voit l'arbre et la flamme de la bougie.

Réponse textuelle	Réponse schématisée	Réponse textuelle et schématisée	Sans réponse, « ne sait pas »
0,0 % (- 37,8 %)	69,8 % (+ 36,5 %)	14,0 % (+ 7,3 %)	16,3 % (- 5,9 %)

Catégorie de réponse	Pourcentage de réponse
Œil actif	18,6 % (+ 9,7 %)
Œil passif	72,1 % (+ 63,2 %)
Œil (sans précision, "grâce à l'œil")	0,0 % (- 28,9 %)
Besoin d'une source de lumière (lumière, Soleil, ...)	74,4 % (+ 23,3 %)
Modélisation de la lumière (rayon lumineux incorrect, flèche)	0,0 % (- 24,4 %)
Modélisation de la lumière (rayon lumineux correct)	81,4 % (+ 81,4 %)
Autre...	0,0 % (- 4,4 %)

Tableau 9. Statistiques post-test de la question sur le principe de la vision dans la partie 4 ; en rouge, les conceptions, en vert, les notions correctes ; entre parenthèses, les pourcentages d'augmentation (+) ou de diminution (-) par rapport au post-test (n = 43).

Question : À l'aide d'une phrase et/ou d'un schéma (en traçant sur l'image), explique : si le cube / la pyramide est dans la lumière ou dans l'ombre.

Réponse textuelle	Réponse schématisée	Réponse textuelle et schématisée	Sans réponse, « ne sait pas »
11,6 % (- 17,3 %)	46,5 % (+ 15,4 %)	30,2 % (- 5,4 %)	11,6 % (+ 2,7 %)

Catégorie de réponse	Pourcentage de réponse
Cube dans la lumière, pyramide dans l'ombre	0,0 % (- 6,7 %)
Cube dans l'ombre, pyramide dans la lumière	60,5 % (+ 2,7 %)
Cube dans la lumière, pyramide dans la lumière	14,0 % (+ 5,1 %)
Cube dans l'ombre, pyramide dans l'ombre	14,0 % (- 6,0 %)
Modélisation de la lumière (rayon lumineux incorrect, flèche)	18,6 % (- 32,5 %)
Modélisation de la lumière (rayon lumineux correct)	48,8 % (+ 48,8 %)
Modélisation d'un faisceau lumineux (cône incorrect)	14,0 % (- 6,0 %)
Modélisation d'un faisceau lumineux (cône correct)	58,1 % (+ 27,0 %)
Légende des zones (zone de lumière, zone d'ombre)	20,9 % (+ 3,1 %)
Autre...	7,0 % (+ 7,0 %)

Tableau 10. Statistiques post-test de la question sur la position d'un objet dans une zone éclairée ou dans une zone d'ombre dans la partie 4 ; en rouge, les mauvaises réponses et conceptions, en vert, les bonnes réponses et notions ; entre parenthèses, les pourcentages d'augmentation (+) ou de diminution (-) par rapport au post-test (n = 43).

Question : À l'aide d'une phrase et/ou d'un schéma (en traçant sur l'image) : Que voit-on par le trou T1 ? Que voit-on par le trou T2 ? Que voit-on par le trou T3 ?

Réponse textuelle	Réponse schématisée	Réponse textuelle et schématisée	Sans réponse, « ne sait pas »
32,6 % (- 5,2 %)	37,2 % (+ 21,6 %)	18,6 % (- 5,8 %)	11,6 % (- 8,4 %)

Catégorie de réponse	Pourcentage de réponse
T1 : on voit la flamme	23,3 % (+ 3,3 %)
T1 : on ne voit pas la flamme (ou on voit autre chose)	62,8 % (+ 5,0 %)
T2 : on voit la flamme	34,9 % (+ 3,8 %)
T2 : on ne voit pas la flamme (ou on voit autre chose)	51,2 % (+ 4,5 %)
T3 : on voit la flamme	72,1 % (+ 14,3 %)
T3 : on ne voit pas la flamme.	11,6 % (- 8,4 %)
Œil actif	14,0 % (+ 7,3 %)
Œil passif	11,6 % (+ 11,6 %)
Œil (trait non fléché)	20,9 % (- 8,0 %)
Modélisation de la lumière (rayon lumineux incorrect, flèche)	25,6 % (- 5,5 %)
Modélisation de la lumière (rayon lumineux correct)	27,9 % (27,9 %)
Autre...	0,0 % (+ 0,0 %)

Tableau 11. Statistiques post-test de la question sur la visibilité de la flamme d'une bougie à travers un écran percé ; en rouge, les mauvaises réponses et conceptions, en vert, les bonnes réponses et notions ; entre parenthèses, les pourcentages d'augmentation (+) ou de diminution (-) par rapport au post-test (n = 43).

Discussion : À l'inverse du *pré*-test, le recours aux schémas prédomine : 55,8 % de réponses « schématisées » + « textuelles et schématisées ». Les élèves ont pris l'habitude de représenter la lumière à l'aide du modèle du rayon lumineux. Globalement, le taux de bonnes réponses augmente pour chaque exercice tandis que le taux de mauvaises réponses diminue. Cependant, quelques conceptions restent présentes, en particulier la conception de l'œil actif qui a augmenté dans deux exercices, même si la tendance à considérer l'œil passif a augmenté aussi. Par ailleurs, dans l'exercice demandant de dire si un objet est dans une zone lumineuse ou dans une zone d'ombre, la bonne réponse « Cube dans l'ombre, pyramide dans la lumière » a été exprimée plus fréquemment pendant que les mauvaises réponses « Cube dans la lumière, pyramide dans l'ombre » et « Cube dans l'ombre, pyramide dans l'ombre » (pour celle-ci, certains élèves dessinent encore un faisceau droit au lieu de dessiner un faisceau divergent) ont été exprimées moins fréquemment. Néanmoins, la mauvaise réponse « Cube dans la lumière, pyramide dans la lumière » a été plus fréquente car les élèves ont retranscrit le principe de la vision dans cet exercice (diffusion de la lumière par la pyramide vers le cube : considérée comme faux pour les catégories explicitées, même si le principe est exact, car il fallait représenter un faisceau lumineux (c'est un problème de consigne et de formulation à corriger)).

- Partie 5 (choix de modèle)

Les résultats de la partie 5 sur le choix de modèle sont affichés et développés (**Figure 28** et **Figure 29**). Les résultats d'analyse de l'évaluation sommative peuvent donner lieu à un regard critique de cette partie.

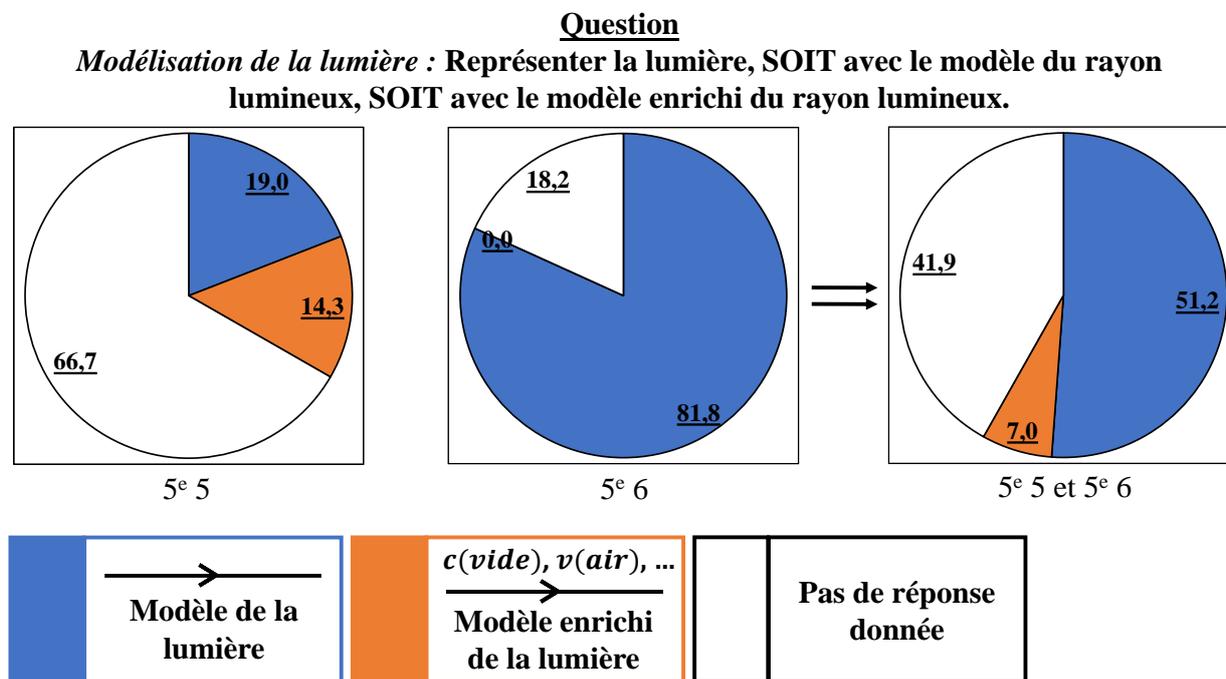


Figure 28. Statistiques post-test (partie 5) du choix du modèle de la lumière sans préciser le milieu de propagation dans la question.

Discussion : En 5^e 5, en laissant le choix de modélisation de la lumière aux élèves (**Figure 28**), 14,3 % portent ce choix sur le modèle enrichi du rayon lumineux ; dans ces 14,3 % (correspondant à 3 élèves sur 21), 20 % le font dans le vide (1 élève), 60 % dans l'air (3 élèves) et 20 % dans l'eau (1 élève), sachant qu'un élève a décidé de modéliser trois rayons (un par milieu). En 5^e 6, aucun ne fait le choix du modèle enrichi et tous se tournent vers le modèle « normal » ou « classique ». En remarque, peu importe le milieu, tous les élèves ont représenté correctement le modèle choisi.

En laissant un choix identique de modélisation tout en précisant un milieu (le vide) (**Figure 29**), 23,8 % choisissent le modèle enrichi en 5^e 5 ; 68,2 % en 5^e 6 ; 46,5 % pour la 5^e 5 et la 5^e 6 réunies. Ce pourcentage supplémentaire (+ 9,5 % en 5^e 5, + 68,2 % en 5^e 6, + 39,5 % en 5^e 5 et en 5^e 6) traduit l'intérêt, pour les élèves, du modèle enrichi par rapport au premier modèle, celui d'explicitier le milieu de propagation. Comme l'ont démontré certaines questions de l'évaluation (**Figure 20** de la section VI) 3. ii), cette information est importante pour réaliser qu'un rayon lumineux peut se propager à une vitesse différente d'un autre en précisant la vitesse de propagation qui varie (**Figure**

21 de la section VI) 3. ii). En remarque, certains élèves ont mal représenté le modèle enrichi qu'ils ont choisi (par exemple, écrire v ou $v(\text{air})$ au lieu de c ou $c(\text{vide})$), mais cela n'est pas retenu car ce n'est pas le but de la question et de la figure.

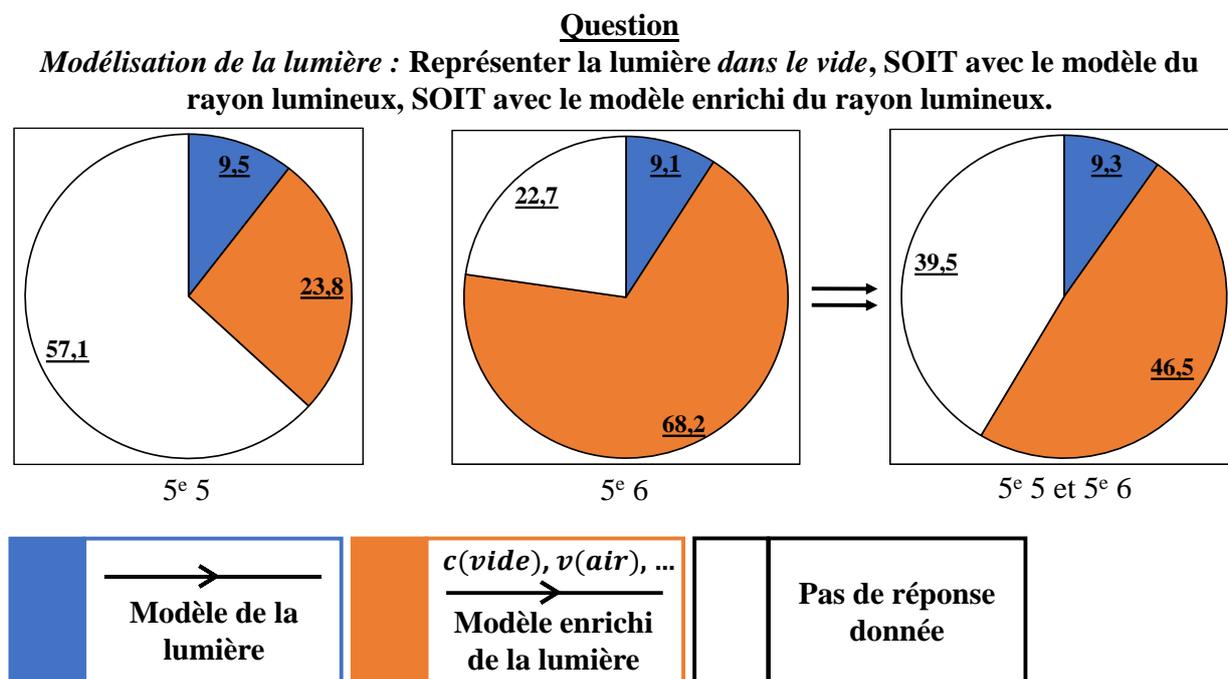


Figure 29. Statistiques post-test (partie 5) du choix du modèle de la lumière en précisant le milieu de propagation dans la question.

- Partie 5 (choix de modèle, sans tenir compte des réponses non données)

Dans les deux cas, le pourcentage de réponses non données est élevé, sans doute pour la même raison déjà énoncée par rapport au temps insuffisant laissé aux élèves. Il convient ainsi de rester prudent sur ce qui peut être tiré.

Pour pallier cela et tirer meilleur parti des chiffres, un produit en croix est calculé pour considérer, dans les pourcentages, uniquement les élèves ayant répondu (les parties blanches du diagramme ne sont donc plus prises en compte). Cela permet de généraliser les réponses. D'où, parmi les élèves ayant répondu :

- Lorsque le milieu de propagation n'est pas précisé : 57,1 % (5e 5), 100,0 % (5e 6) et 88,0 % (5e 5 et 5e 6) optent pour le modèle de la lumière ; 42,9 % (5e 5), 0,0 % (5e 6) et 12,0 % (5e 5 et 5e 6) pour le modèle enrichi de la lumière.
- Lorsque le milieu de propagation est précisé : 28,6 % (5e 5), 11,8 % (5e 6) et 16,7 % (5e 5 et 5e 6) optent pour le modèle de la lumière, soit - 28,5 %, - 88,2 %, - 71,3 % en moins ; 71,4 %

(5e 5), 88,2 % (5e 6) et 83,3 % (5e 5 et 5e 6) optent pour le modèle enrichi de la lumière, soit + 28,5 %, + 88,2 %, + 71,3 % en plus.

Nouvelle discussion : La tendance témoigne ainsi, en moyenne (considérant 5^e 5 et 5^e 6), que seulement 12,0 % des élèves se servent du rayon enrichi pour la modélisation de la lumière, mais que ce pourcentage va jusqu'à 83,3 % lorsque le milieu de propagation est renseigné. L'*annexe X*) 18 livre une représentation visuelle de ces éléments. Les résultats confirment davantage la tendance observée dans les résultats de la **Figure 29** par rapport à la **Figure 28**.

- Partie 5 (choix de modèle appliqué)

Les autres résultats de la partie 5 sont affichés et développés (**Figure 30**, **Figure 31** et **Figure 32**).

Discussion : Ces nouveaux résultats confirment le fait que les exercices/problèmes d'application sont plus complexes pour les élèves. Sur la base de la **Figure 29**, même si le choix leur est laissé libre, l'utilisation du modèle enrichi de la lumière était attendu car le milieu était précisé dans chacune des situations. Or, en regardant les réponses effectives, le taux d'emploi du modèle en question n'atteint pas les mêmes attentes (dans la **Figure 30**, inférieur à 50 %, alors que ce taux était quasiment égal à 50 % lorsqu'il était simplement question de définir la lumière selon un modèle, n'importe lequel, dans le vide). Dans ce sens, il peut surtout être dit que le pourcentage du modèle enrichi est inférieur au pourcentage du modèle « non-enrichi », alors que c'était l'inverse lorsqu'il fallait donner un modèle – modèle « non-enrichi » ou modèle enrichi – dans le vide (**Figure 29**). Le modèle enrichi prenant, additionnellement, plus de temps, la question du temps manquant est posée pour orienter vers tel ou tel modèle.

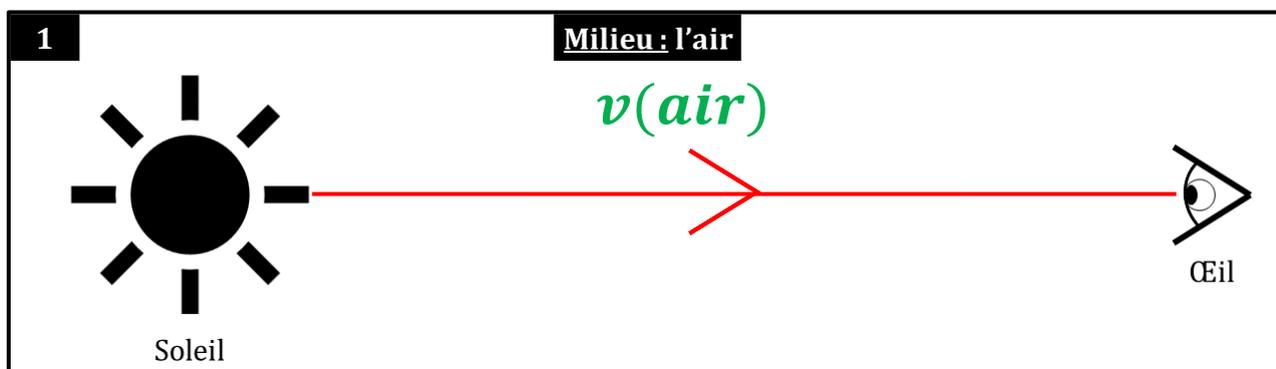
Des justifications comme : « *parce que le Soleil est plus puissant* », « *le Soleil a une plus grande quantité de lumière* », « *car la vitesse du soleil (sic) est plus rapide* », « *je pense que le soleil (sic) serait plus rapide* », pour expliquer que le rayon lumineux provenant du Soleil arriverait avant le rayon lumineux provenant de la flamme (que les milieux soient les mêmes ou non) ont été trouvées. Certains élèves, même si cela concerne une minorité d'entre eux (exemples incorrects ou réponses non justifiées), continuent à penser que la vitesse de la lumière pourrait dépendre de la source ; c'est une conception erronée qui persiste chez certains élèves malgré la séquence enseignée. Dernière remarque : dans la **Figure 30**, certains élèves (18,6 %) ont mal représenté le modèle enrichi qu'ils ont choisi (ou encore, trois élèves ont représenté le rayon lumineux tel que l'œil soit actif (sens orienté

de l'œil vers le Soleil, et non l'inverse)) ; dans la **Figure 31**, certains élèves (23,3 %, 20,9 %, 25,6 %, 25,6 %) ont mal représenté le modèle enrichi qu'ils ont choisi.

Question

Dans chaque situation, représenter la lumière, de la source primaire à l'œil, avec le modèle que tu veux (modèle « classique » ou modèle enrichi).

Milieu : l'air



Modèle de la lumière : 46,5 %

Modèle enrichi de la lumière : 34,9 %

Pas de réponse donnée : 18,6 %

Figure 30. Statistiques post-test (partie 5) du choix du modèle de la lumière, situation où la lumière qui est issue du Soleil se dirige vers l'œil dans l'air. Les % concernent la 5e 5 et la 5e 6.

Question

Dans chaque situation, représenter la lumière, de la source primaire à l'œil, avec le modèle que tu veux (modèle « classique » ou modèle enrichi).

Milieux : l'air (haut) et l'air (bas)

Modèle de la lumière : 46,5 %

Modèle enrichi de la lumière : 30,2 %

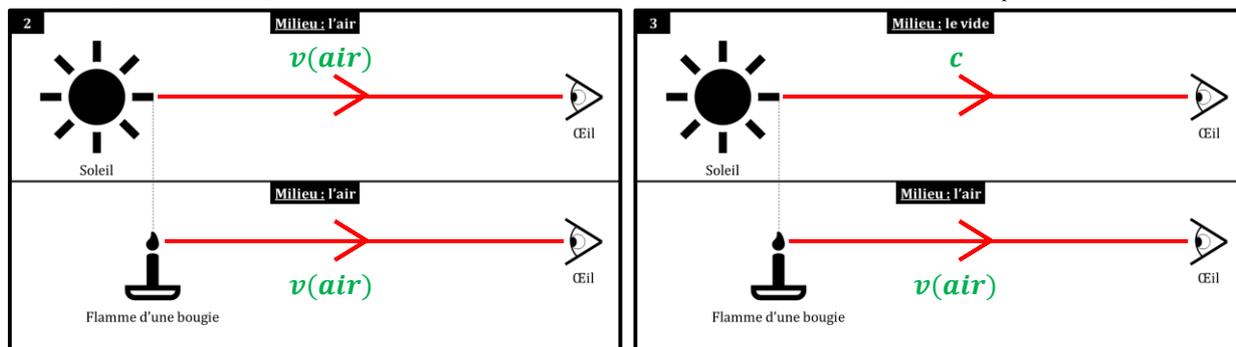
Pas de réponse donnée : 23,3 %

Milieux : le vide (haut) et l'air (bas)

Modèle de la lumière : 46,5 %

Modèle enrichi de la lumière : 25,6 %

Pas de réponse donnée : 27,9 %



Modèle de la lumière : 53,5 %

Modèle enrichi de la lumière : 25,6 %

Pas de réponse donnée : 20,9 %

Modèle de la lumière : 51,2 %

Modèle enrichi de la lumière : 23,3 %

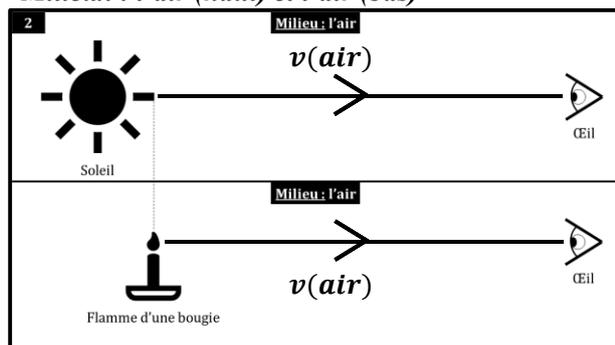
Pas de réponse donnée : 25,6 %

Figure 31. Statistiques post-test (partie 5) du choix du modèle de la lumière, situations. Les % concernent la 5e 5 et la 5e 6.

Question

Dans ces situations 2 et 3, la lumière provenant du Soleil et la lumière provenant de la flamme arrivent-elles en même temps vers l'œil ?

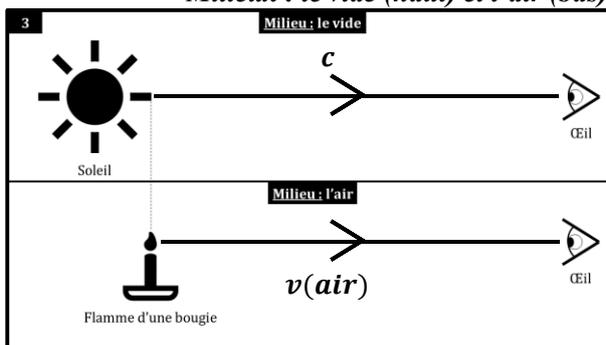
Milieu : l'air (haut) et l'air (bas)



Oui : 55,8 % (bonne réponse)
Non : 14,0 % (mauvaise réponse)
Pas de réponse donnée : 30,2 %

Justification : 41,9 % (bonne justification)
Justification : 14,0 % (mauvaise justification)
Pas de réponse donnée : 44,2 %

Milieu : le vide (haut) et l'air (bas)



Oui : 23,3 % (mauvaise réponse)
Non : 41,9 % (bonne réponse)
Pas de réponse donnée : 34,9 %

Justification : 30,2 % (bonne justification)
Justification : 23,3 % (mauvaise justification)
Pas de réponse donnée : 46,5 %

Figure 32. Statistiques post-test (partie 5) de la Figure 31 répondant à la question énoncée en haut de la figure. Les % concernent la 5e 5 et la 5e 6.

- Partie *feed-back post-test*

Les résultats de la partie sur le retour des élèves sont affichés et développés :

- À la question « *Penses-tu avoir compris le chapitre sur la lumière ?* » : « Oui, très bien » pour 14,0 %, « Oui, à peu près » pour 30,2 %, « Oui, à peu près – Non, pas trop » (ajouté par les élèves) pour 4,7 %, « Non, pas trop » pour 18,6 %, « Non, pas du tout » pour 4,7 % (27,9 % n'ont pas répondu).
- À la question « *As-tu révisé le chapitre sur la lumière ?* » : « Oui » pour 48,8 %, « Entre oui et non » pour 7,0 % (ajouté par les élèves), « Non » pour 11,6 % (32,6 % n'ont pas répondu).

Discussion : En fin d'année de 5^e, 44,2 % des élèves interrogés, disent avoir plus ou moins compris le chapitre sur la lumière, 23,3 % disent ne pas avoir plus ou moins compris, 4,7 % se disent entre les deux (27,9 % n'ont pas répondu).

Dans la dernière annexe, l'annexe X) 19, la séquence sur la lumière est référencée.

CONCLUSION

VII) Conclusion et réponse à la problématique

Une étude réflexive sur la représentation de la lumière dans le modèle du rayon lumineux constituait le thème de cet écrit. *Et facta est lux*, « et la lumière fut ! »

En introduction, la proposition didactique était d'**intégrer la vitesse dans la modélisation**, dans la mesure où **la vitesse de la lumière n'est pas la même selon le milieu de propagation**. La problématique était la suivante : « *Comment intégrer la vitesse de la lumière dans le modèle de propagation de la lumière ? Quel est l'impact de l'utilisation d'un modèle intégrant la vitesse sur les apprentissages des élèves ?* »

Dans l'état de l'art, des conceptions sur la définition de la nature de la lumière et sur l'emploi du modèle de la lumière pour décrire le phénomène de vision ont été relevées. Les élèves de cycle 4 (12-15 ans à peu près) ou de cycle inférieur **tendent à ne pas attribuer de nature réelle à la lumière** et à la confondre avec la source dont elle est issue ou avec les effets qu'elle produit ; ils **tendent aussi à considérer l'œil comme actif** (le rayon lumineux sort de l'œil au lieu d'y rentrer). À ces conceptions s'ajoute une autre, sous-estimée, sur la **vitesse de la lumière**. En effet, à ce niveau d'étude, **le caractère fini de la vitesse de la lumière n'est pas acquis et certains élèves tendent à penser que la valeur de la vitesse peut dépendre des caractéristiques de la source**, comme la puissance (le Soleil est puissant par rapport à une lampe, la lumière qu'il envoie ira alors plus vite). **La dépendance de la vitesse de la lumière au changement de milieu de propagation n'est pas acquise**. Pour mener à bien la recherche, la méthodologie se séparait en deux temps : une **étude comparative de la présentation de la lumière et de la célérité de la lumière dans les manuels**, puis une **étude de situation expérimentée** en classes de 5^e.

Dans un premier temps, la comparaison des activités proposées dans les manuels a montré que **la vitesse de la lumière en fonction du milieu dans laquelle elle se propage ne semble pas centrale** car aucune activité (ou élément de cours) lui est spécifiquement dédiée. Or, l'étude de la littérature montre qu'il n'est pas certain que les élèves réalisent que la lumière puisse se propager à une vitesse

finie (300 000 000 m/s dans le vide), et encore moins que cette vitesse peut changer si le milieu n'est pas le vide.

Dans un deuxième temps, un modèle de la lumière dit « **enrichi** » a été proposé. L'originalité de ce modèle est de **tenir compte de la vitesse et du changement de la valeur de la vitesse en fonction du milieu**. Ce modèle a été amené aux élèves à travers deux activités qui ont été présentées ; l'une d'elle intégralement dédiée à cette dépendance. Leur mise en œuvre pédagogique a également été présentée, en utilisant l'histoire comme approche. Pour questionner le gain didactique et l'intérêt pédagogique de ces activités, des questionnaires, sous la forme de *pré*-tests et de *post*-tests, furent remis aux élèves avant d'être analysés. Par exemple, les résultats montrent, qu'avant séquence, **44,4 % ne savent pas que la vitesse de la lumière est finie** ; ils ne sont plus que 20,9 % à conserver cette fausse idée après la séquence d'enseignement. De plus, **77,8 % des élèves ne savent pas que la vitesse de la lumière produite par le Soleil est identique à celle diffusée par la Lune** ; ils ne sont plus que 37,2 % après la séquence d'enseignement. L'effort porté sur l'enseignement renforcé de la vitesse dans la séquence sur la lumière confirme certains résultats d'analyse du *post*-test par rapport au *pré*-test, puisque lorsque les élèves devaient décrire le mouvement de la lumière, **l'information sur la vitesse était prédominante**.

Toujours dans le deuxième temps méthodologique, en évaluation sommative, la prise de conscience du caractère dépendant de la valeur de la vitesse de la lumière a été évalué. Répondant à la question « **La vitesse de propagation de la lumière dépend-elle du milieu dans lequel elle se propage ?** », **84,4 % des élèves répondaient « oui »**. **Figure 20** : répondant à la question « **Les deux rayons arrivent-ils sur leur croix au même moment ?** », **65,9 % répondent « non »** en justifiant correctement, 6,8 % répondent « non » mais en justifiant incorrectement. L'image associée à la **Figure 20** a été complétée avec le modèle enrichi, en revanche, par seulement 45,5 % des élèves qui ont réussi à ajouter le paramètre de la vitesse aux rayons lumineux (un travail de reformulation pourrait augmenter ce pourcentage).

Une partie du *post*-test était vouée à diagnostiquer quel modèle (modèle de la lumière, modèle enrichi de la lumière) les élèves choisissaient pour définir la lumière. **Lorsque le milieu de propagation n'est pas précisé, le modèle de la lumière l'emporte. Lorsque le milieu de propagation est précisé, le modèle enrichi l'emporte cette fois-ci.**

L'emploi du modèle de la lumière dans sa version « enrichie » souligne l'**importance de la prise en compte de la dépendance du milieu dans la vitesse de la lumière**. La dépendance de la source n'a pas lieu d'être.

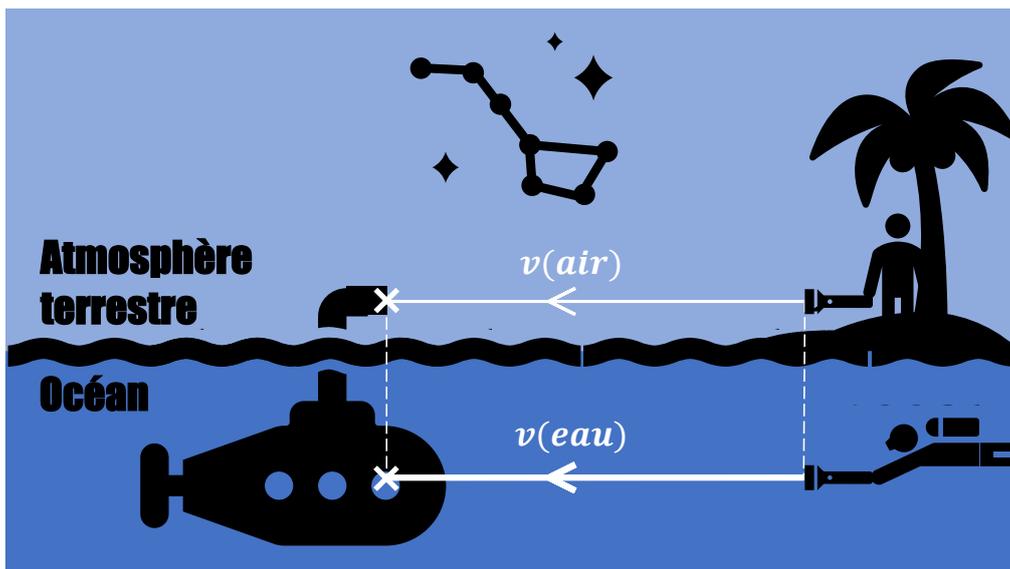


Figure 33. Les deux rayons arrivent-ils sur leur croix au même moment ? Résolution au moyen du modèle enrichi de la lumière (rayon lumineux avec vitesse).

Certaines limites de l'étude restent à signaler. L'expérimentation aura été réalisée sans classe témoin. La faible taille d'échantillon – seulement deux classes dans un même collège avec son propre climat scolaire – peut ne pas être suffisamment représentatif d'une population plus large d'élèves de 5^e (les résultats ne peuvent être généralisés pour tous les 5^e), ce qui peut entraîner des incertitudes à la fois sur les conclusions des *pré*-tests et des *post*-tests pris dans leur ensemble et sur les conclusions tirées des activités. Aussi, un autre enseignant aurait pu obtenir des résultats différents en présentant la séquence de la lumière avec le modèle enrichi donc le rôle de l'enseignant peut également avoir un effet dans la classe.

VIII) Perspectives proposées

Propositions

Un certain nombre de perspectives peuvent être envisagées. Les conceptions des élèves sur la lumière ont été largement scrutées et il serait intéressant d'inventorier celles sur le son et de chercher si les conceptions sont les mêmes, si l'histoire de la vitesse du son est également une approche didactique pertinente.

L'analyse des questionnaires *pré-* et *post-* pourrait être plus poussée, notamment en performant une analyse dite dynamique. Parmi ceux qui ont répondu que la lumière se propage avec une vitesse finie (ou infinie), il serait intéressant d'inspecter ce que ces mêmes élèves ont répondu par la suite, concernant la vitesse de la lumière provenant du Soleil comparée à la vitesse de la lumière provenant de la Lune, par exemple.

Le profil des élèves pourrait être pris en compte sur l'application du modèle enrichi de la lumière. Il semblerait que ce soient les élèves avec de meilleurs résultats aux évaluations qui utilisent plus souvent et plus correctement ce genre de modèle étant donné qu'il apporte une forme de complexité au modèle de base. Des données et des chiffres pourraient attester ou non de ce constat qui reste subjectif.

Enfin, une dernière proposition consiste à la composition d'une activité centrée seulement sur la non-dépendance de la valeur de la vitesse de la lumière par rapport à la source de lumière. En analysant les données des différents questionnaires, cette conception revenait communément et restait encore plusieurs fois après la séquence d'enseignement. Un modèle « doublement enrichi » (information sur la vitesse et, en plus, de la source) pourrait-il aider à lever ce genre d'erreur ?

À retenir pour la pratique

D'abord, les conceptions des élèves sont habituellement méconnues et en prendre conscience, côté professeur, contribue à penser et à repenser les activités. La recherche est une démarche qui, en tant qu'enseignant, permet d'agir sur les relations enseignant-savoir (axe didactique et épistémologique) et enseignant-élève (axe pédagogique et praxéologique) et de les questionner. En être sensibilisé est dans l'intérêt de l'élève pour participer à la réussite de chacune ou de chacun, répondre aux besoins de tous (logique d'inclusion), motiver à apprendre et endiguer l'échec scolaire.

Puis, les conceptions des élèves sont compliquées, parfois contradictoires, et en fin de compte tenaces. Le point exprimé dans les propositions des perspectives, sur l'analyse dynamique, met ce caractère compliqué et contradictoire en valeur. « À ton avis, la lumière se propage : [...] » : après avoir répondu « avec une vitesse infinie », un certain nombre d'élèves ont indiqué par la suite que la vitesse de la lumière provenant du Soleil était plus grande que celle provenant de la Lune. La réponse « égale », bien que ce soit la réponse compatible avec le concept d'infini (semble-t-il mal compris), pouvait ne pas ressortir, rendant plus difficile l'analyse des résultats. Quant au caractère tenace des conceptions, certaines d'entre elles ont été bousculées chez certains élèves après séquence, d'autres non. L'enseignement du chapitre sur la lumière (avec le modèle enrichi mais cela reste valable aussi sans) n'a pas conduit à un pourcentage de bonnes réponses de 100.

BIBLIOGRAPHIE

IX) Références bibliographiques

Normes *American Psychological Association* (APA), 7e édition.

- Albert A. Michelson. (2021). In *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Albert_A._Michelson&oldid=183603684
- Alfred Cornu. (2021). In *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Alfred_Cornu&oldid=183800824
- Alhazen. (2021). In *Wikipédia*. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Alhazen&oldid=189298934>
- Artru, M.-C. (2011, mai 27). *L'expérience « laser-lune »*. CultureSciences-Physique. <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/laser-distance-terre-lune.xml>
- Artru, M.-C., Bonnet, G., & Glenat, M. (2012, avril 26). *Vitesse superluminique en astronomie*. CultureSciences-Physique. <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/vitesse-superluminique.xml>
- Azan, J.-L., & Collectif. (2017a). *Physique-Chimie 3e (Nathan)* (R. Houette, J. Taillade, M. Juhel, & C. Edenhoffer, Éd.; Édition 2017). Nathan.
- Azan, J.-L., & Collectif. (2017b). *Physique-Chimie 4e (Nathan)* (R. Houette, J. Taillade, M. Juhel, & C. Edenhoffer, Éd.; Édition 2017). Nathan.
- Azan, J.-L., & Collectif. (2017c). *Physique-Chimie 5e (Nathan)* (R. Houette, J. Taillade, M. Juhel, & C. Edenhoffer, Éd.; Édition 2017). Nathan.
- Azan, J.-L., & Collectif. (2017d). *Physique-Chimie Cycle 4 (Nathan)* (R. Houette, J. Taillade, M. Juhel, & C. Edenhoffer, Éd.; Édition 2017). Nathan.
- Azan, J.-L., & Collectif. (2017e). *Physique-Chimie Cycle 4—Livres du professeur (Nathan)* (R. Houette, J. Taillade, M. Juhel, & C. Edenhoffer, Éd.; Édition 2017). Nathan.
- Bonnet, G. (2003, septembre 12). *Historique : De Galilée à nos jours, évolution de la notion de vitesse de la lumière*. CultureSciences-Physique. <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/VLum.xml>
- CERIMES (Centre de Ressources et d'Informations sur le Multimédia pour l'Enseignement Supérieur). (2006, janvier 1). *Histoire des mesures de la vitesse de la lumière* [[Vidéo]]. Canal-U. <https://www.canal-u.tv/56665>
- de Broglie, L. (1924). *Recherches sur la théorie des Quanta*.

- de Hosson, C. (2004). *Contribution à l'analyse des interactions entre histoire et didactique des sciences. Elaboration d'un support d'enseignement du mécanisme optique de la vision pour l'école primaire et le collège et premiers éléments d'évaluation*. [Doctorat]. Université Paris-Diderot - Paris VII.
- de Hosson, C., & Kaminski, W. (2006). Un support d'enseignement du mécanisme de la vision inspiré de l'histoire des sciences. *Didaskalia*, 28. <https://doi.org/10.4267/2042/23955>
- de Hosson, C., & Kaminski, W. (2007). Historical Controversy as an Educational Tool : Evaluating elements of a teaching–learning sequence conducted with the text “Dialogue on the Ways that Vision Operates”. *International Journal of Science Education*, 29(5), 617-642. <https://doi.org/10.1080/09500690600802213>
- Delacôte, G., Guesne, E., & Tiberghien, A. (1978). Méthodes et résultats concernant l'analyse des conceptions des élèves dans différents domaines de la physique [deux exemples [:] Les notions de chaleur et de lumière]. *Revue française de pédagogie*, 45(1), 25-32. <https://doi.org/10.3406/rfp.1978.1674>
- Dulaurans, T., Barde, M., Bigorre, M., Dessaint, S., Lémonie, C., Matagne, E., Poudens, B., Tarride, I., & Théboeuf, D. (2017a). *Physique-Chimie 3e (Hachette Éducation)* (A. Bertin, V. Dumur, N. Legros, & C. Kocalénios, Éd.s.; éd. 2017 (nouveau programme)). Hachette Livre. <https://fr.calameo.com/read/0048229536654d2828db8>
- Dulaurans, T., Barde, M., Bigorre, M., Dessaint, S., Lémonie, C., Matagne, E., Poudens, B., Tarride, I., & Théboeuf, D. (2017b). *Physique-Chimie 4e (Hachette Éducation)* (A. Bertin, V. Dumur, N. Legros, & C. Kocalénios, Éd.s.; éd. 2017 (nouveau programme)). Hachette Livre. <https://fr.calameo.com/read/004822953a5df1b53eac0>
- Dulaurans, T., Barde, M., Bigorre, M., Dessaint, S., Lémonie, C., Matagne, E., Poudens, B., Tarride, I., & Théboeuf, D. (2017c). *Physique-Chimie 5e (Hachette Éducation)* (A. Bertin, V. Dumur, N. Legros, & C. Kocalénios, Éd.s.; éd. 2017 (nouveau programme)). Hachette Livre. <https://fr.calameo.com/read/0048229535abc36a310fd>
- Dulaurans, T., Barde, M., Bigorre, M., Dessaint, S., Lémonie, C., Matagne, E., Poudens, B., Tarride, I., & Théboeuf, D. (2017d). *Physique-Chimie cycle 4 (Hachette Éducation)* (A. Bertin, V. Dumur, N. Legros, & C. Kocalénios, Éd.s.; éd. 2017 (nouveau programme)). Hachette Livre. <https://fr.calameo.com/read/00482295385563ce6bb4b>
- éduscol. (2019a). *Programme de première générale (arrêté du 17-1-2019 publiés au BO spécial n° 1 du 22 janvier 2019)*. <https://eduscol.education.fr/document/22666/download>
- éduscol. (2019b). *Programme de seconde générale et technologique (arrêté du 17-1-2019 publiés au BO spécial n° 1 du 22 janvier 2019)*. <https://eduscol.education.fr/document/22663/download>
- éduscol. (2019c, octobre). *RA19 (Lycée GT)—Les conceptions initiales sur la formation des images (1192198.pdf)*. https://cache.media.eduscol.education.fr/file/Physique-chimie/19/8/RA19_Lycees_GT_2-1-T_PHYCHI_Conceptions-initiales-formation-images_1192198.pdf
- éduscol. (2020). *Programme du cycle 4 [En vigueur à la rentrée 2020]*. <https://eduscol.education.fr/document/621/download>

- Edward Morley. (2021). In *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Edward_Morley&oldid=186307437
- Einstein, A. (1905a). Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Annalen der Physik*, 323(13), 639-641. <https://doi.org/10.1002/andp.19053231314>
- Einstein, A. (1905b). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 322(6), 132-148. <https://doi.org/10.1002/andp.19053220607>
- Einstein, A. (1905c). Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, 322(10), 891-921. <https://doi.org/10.1002/andp.19053221004>
- Einstein, A. (1915). *Zur allgemeinen Relativitätstheorie*. Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), Seite 778-786.
- Einstein, A. (1916). Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 354(7), 769-822. <https://doi.org/10.1002/andp.19163540702>
- Fetherstonhaugh, A. R. (1990). Misconceptions and light : A curriculum approach. *Research in Science Education*, 20(1), 105-113. <https://doi.org/10.1007/BF02620485>
- Franchot, N., Fray, B., & Communauté d'auteurs. (2017a). *Physique-Chimie 3e (lelivrescolaire.fr)* (Nouveau programme (collection 2017)). Lelivrescolaire.fr. <https://fr.calameo.com/read/0005967298a8b2ce5c231?authid=qHtU4ZxA2RVR>
- Franchot, N., Fray, B., & Communauté d'auteurs. (2017b). *Physique-Chimie 4e (lelivrescolaire.fr)* (Nouveau programme (collection 2017)). Lelivrescolaire.fr. <https://fr.calameo.com/read/00059672968a0a3d81d81?authid=MqJu6TIE1ql6>
- Franchot, N., Fray, B., & Communauté d'auteurs. (2017c). *Physique-Chimie 5e (lelivrescolaire.fr)* (Nouveau programme (collection 2017)). Lelivrescolaire.fr. <https://fr.calameo.com/read/000596729a630ee7c7f42?authid=olfuxMV4X6gA>
- Franchot, N., Fray, B., & Communauté d'auteurs. (2017d). *Physique-Chimie Cycle 4 (manuel unique) (lelivrescolaire.fr)* (Nouveau programme (collection 2017)). Lelivrescolaire.fr. <https://fr.calameo.com/read/000596729a478266ce0b6?authid=kye07xnwkoHr>
- Galilée (savant). (2022). In *Wikipédia*. [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Galil%C3%A9_\(savant\)&oldid=189660323](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Galil%C3%A9_(savant)&oldid=189660323)
- Guesne, E. (1985). Light. In *Children's ideas in science* (p. 10-32). Open University Press.
- Haagen-Schützenhöfer, C. (2017). Students' conceptions on white light and implications for teaching and learning about colour. *Physics Education*, 52(4), 044003. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aa6d9c>
- Henri Joseph Anastase Perrotin. (2021). In *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Henri_Joseph_Anastase_Perrotin&oldid=182084770

- Hippolyte Fizeau. (2021). In *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Hippolyte_Fizeau&oldid=189221331
- James Bradley. (2021). In *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=James_Bradley&oldid=188716259
- James Clerk Maxwell. (2022). In *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=James_Clerk_Maxwell&oldid=190542637
- Jean-Dominique Cassini. (2022). In *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Jean-Dominique_Cassini&oldid=189441138
- Kaminski, W. (1989). Conceptions des enfants (et des autres) sur la lumière. *Bulletin de l'union des physiciens*, 83(716), 973-996.
- Larousse, É. (s. d.). *Définitions : Lumière, lumières - Dictionnaire de français Larousse*. Consulté 15 janvier 2022, à l'adresse <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/lumi%C3%A8re/48043>
- Léon Foucault. (2021). In *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=L%C3%A9on_Foucault&oldid=184970343
- Lionel, D., Fray, B., & Communauté d'auteurs. (2019). *Physique-Chimie 1re (lelivrescolaire.fr)* (Collection 2019). Lelivrescolaire.fr. <https://fr.calameo.com/read/00059672938dc3464d263>
- Livre du professeur—Lelivrescolaire.fr*. (s. d.). Consulté 31 décembre 2021, à l'adresse <https://www.lelivrescolaire.fr/livre-du-professeur>
- Lumen, candela et lux. (2020, octobre 19). *Euroka - Lighting your world*. <https://euroka.be/documents/lumen-candela-et-lux/>
- Martinez, M. (2010). *Quelle approche de l'ombre privilégier dans l'enseignement des sciences physiques* [Master]. Université Montpellier II.
- Maurines, L. (1992). Spontaneous reasoning on the propagation of visible mechanical signals. *International Journal of Science Education*, 14(3), 279-293. <https://doi.org/10.1080/0950069920140305>
- Maurines, L. (1993). *Spontaneous reasoning on the propagation of sound*. Proceedings of the third international seminar on misconceptions and educational strategies in science and mathematics, Cornell university.
- Maurines, L., & Beaufils, D. (2011). Un enjeu de l'histoire des sciences dans l'enseignement : L'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique. *RDST*, 3, 271-305. 15/10/2013. <https://doi.org/10.4000/rdst.444>
- Maurines, L., & Mayrargue, A. (2005). *How the investigations of the students' reasoning on waves and the history of physics can help us to develop research-based innovative units for secondary students on the velocity of light?* 13.
- Maxwell, J. C. (1865). VIII. A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 155, 459-512. <https://doi.org/10.1098/rstl.1865.0008>

- MENJS. (2020). *Programme du cycle 4 (publié au BO n°31 du 30 juillet 2020)*.
<https://eduscol.education.fr/document/621/download>
- Mesure des distances en astronomie. (2021). In *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Mesure_des_distances_en_astronomie&oldid=183747946
- Metre. (2022). In *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Metre&oldid=1064277634>
- Newton, I. (1704). *Opticks : Or a Treatise of the Reflexions, Refractions Inflexions and Colours of Light. Also Two Treatises of the Species and magnitude of Curvilinear Figures*.
- Ole Christensen Rømer. (2021). In *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Ole_Christensen_R%C3%B8mer&oldid=188076054
- Oliver Heaviside. (2022). In *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Oliver_Heaviside&oldid=190583491
- Ruffenach, M., Collectif, Brun, A., Chivas, S., Denocq, L., Krygiel, O., & Marois, A. (2017a). *Physique-Chimie 3e (Bordas)* (J. Barret, C. Lequesne, F. Gomariz, & C. Maillochon, Éd.; Ed. 2017). Bordas/Sejer.
- Ruffenach, M., Collectif, Brun, A., Chivas, S., Denocq, L., Krygiel, O., & Marois, A. (2017b). *Physique-Chimie 4e (Bordas)* (J. Barret, C. Lequesne, F. Gomariz, & C. Maillochon, Éd.; Ed. 2017). Bordas/Sejer.
- Ruffenach, M., Collectif, Brun, A., Chivas, S., Denocq, L., Krygiel, O., & Marois, A. (2017c). *Physique-Chimie 5e (Bordas)* (J. Barret, C. Lequesne, F. Gomariz, & C. Maillochon, Éd.; Ed. 2017). Bordas/Sejer.
- Ruffenach, M., Collectif, Brun, A., Chivas, S., Denocq, L., Krygiel, O., & Marois, A. (2017d). *Physique-Chimie Cycle 4 (Bordas)* (J. Barret, C. Lequesne, F. Gomariz, & C. Maillochon, Éd.; Ed. 2017). Bordas/Sejer.
- ScienceEtonnante. (2022, janvier 14). *Comment Mesurer L'Univers?* 
<https://www.youtube.com/watch?v=FGwmAEMabm4>
- Second. (2022). In *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Second&oldid=1080483091>
- Siècle des lumières : Définition simple et facile du dictionnaire*. (s. d.). Consulté 15 janvier 2022, à l'adresse
<https://www.linternaute.fr/dictionnaire/fr/definition/siecle-des-lumieres/>
- Simon Newcomb. (2021). In *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Simon_Newcomb&oldid=188039635
- Uzun, S., & Alev, N. (2013). A cross-age study of an understanding of light and sight concepts in physics. *Science Education International*, 24(2), 129-149.
- Viennot, L. (1982). L'implicite en physique : Les étudiants et les constantes. *European Journal of Physics*, 3, 174-180.
- Viennot, L. (1996). *RAISONNER EN PHYSIQUE. La part du sens commun* (De Boeck).
- Villani, A., & Pacca, J. L. A. (1987). Students' spontaneous ideas about the speed of light. *International Journal of Science Education*, 9(1), 55-66. <https://doi.org/10.1080/0950069870090107>

Wahyuni, A. S. A., Rustaman, N., Rusdiana, D., & Muslim. (2019). Analyze of conceptions and misconceptions on pre-service teacher about light. *Journal of Physics: Conference Series*, 1280(5), 052071.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1280/5/052071>



X) ANNEXES

Les annexes mises à disposition permettent d’informer le lecteur plus en détails sur le contenu de cette production sur la lumière et son modèle. Des références supplémentaires y sont apportées.

ANNEXES

« III) État de l’art »

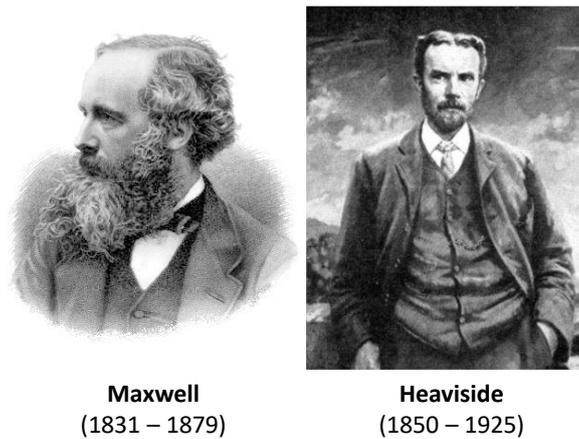
X) 1. Les scientifiques de la vitesse de la lumière et de sa valeur

Portraits des scientifiques nommés dans la partie intitulée : « III) 1. iii Vitesse (finie) ou célérité de la lumière ? », **Figure 34** et **Figure 35**. La vitesse de la lumière a été particulièrement étudiée dans le cadre de l’astronomie, souvent en recourant à l’histoire, de Alhazen à Henri Perrotin, en passant par Christensen Rømer et James Bradley, sans oublier la contribution de James Maxwell.



Figure 34. Liste des scientifiques ayant significativement contribué, avant Maxwell et Heaviside, à établir la vitesse de la lumière comme finie.

Références des images, de gauche à droite et de haut en bas : (« Alhazen », 2021), (« Galilée (savant) », 2022), (« Jean-Dominique Cassini », 2022), (« Ole Christensen Rømer », 2021), (« James Bradley », 2021), (« Hippolyte Fizeau », 2021), (« Alfred Cornu », 2021), (« Léon Foucault », 2021), (« Albert A. Michelson », 2021), (« Edward Morley », 2021), (« Simon Newcomb », 2021), (« Henri Joseph Anastase Perrotin », 2021).



Maxwell
(1831 – 1879)

Heaviside
(1850 – 1925)

Figure 35. Maxwell et Heaviside, scientifiques ayant significativement contribué à l'étude de la lumière. Références des images, de gauche à droite : (« James Clerk Maxwell », 2022), (« Oliver Heaviside », 2022).

Il n'est pas superflu de dire que la synthèse historique présentée dans les pages correspondantes n'est pas exhaustive. La même chose pour la prévalence du nombre de conceptions qui subsistent (et persistent) avec la lumière qui n'auront pas été entièrement traitées (un des points manquants, et seulement vu en surface, par exemple, concernent les couleurs ou encore l'ombre).

X) 2. Précision de la valeur de la vitesse de la lumière (c) : pourquoi est-ce utile ?

X) 2. i. Première situation : définition du mètre

Depuis 1983, selon la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), le mètre est défini comme étant la longueur propre – le terme « propre » est une précision de 2002, rendant compte des effets de contraction des longueurs en relativité restreinte qui sont négligés – du chemin parcouru par la lumière sur un intervalle de temps (Δt , en seconde (s)) qui est de $\Delta t = \Delta d/v = 1/c = (1\text{ m})/(299\,792\,458\text{ m/s}) = 3,335\,640\,95 \times 10^{-9}\text{ s} = 3,335\,640\,95\text{ ns}$ (« Metre », 2022). La donnée de la seconde suffit alors pour définir le mètre, or depuis 1967, la seconde est définie à partir de la mesure de la fréquence ν de l'atome de césium Cs (horloge atomique à l'isotope stable césium ^{133}Cs) : c'est la durée de 9 192 631 770 périodes de radiation ($\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz (s}^{-1}\text{)}$) correspondant à la transition entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental non perturbé de l'atome (« Second », 2022).

Les conséquences de définir le mètre à partir de la seconde sont que la célérité de la lumière c devient une constante explicite dont le terme « constant » prend tout son sens : la valeur du mètre

dépend seulement de la précision de la mesure de la seconde et la valeur de c prend donc une valeur exacte.

X) 2. ii. Deuxième situation : astronomie

Plusieurs méthodes permettent de caractériser des distances en astronomie (« Mesure des distances en astronomie », 2021; ScienceEtonnante, 2022). La mesure de la distance entre la Terre et la Lune, 384 000 km en moyenne (en moyenne car varie à cause de l'éloignement de la Lune par rapport à la Terre, trajectoire elliptique et non circulaire), est un cas d'école : c'est la télémétrie laser. En envoyant, depuis la surface de la Terre, un signal laser vers la surface de la Lune, le rayon peut être réfléchi grâce à des réflecteurs posés lors de la mission Apollo 11 en 1969 (et durant d'autres missions successives) servant à renvoyer la lumière dans la direction d'incidence. La distance Terre-Lune (d_{T-L}), calculée deux fois (soit $2 \cdot d_{T-L}$) car tenant compte du trajet aller (Terre vers Lune) et du trajet retour (Lune vers Terre), vaut donc : $2 \cdot d_{T-L} = c \times \Delta t$, avec c la célérité de la lumière, Δt le temps d'aller-retour. Cela justifie la précision des instruments de mesure ou des satellites avec la géolocalisation. L'effet de l'atmosphère dans l'expérience, lorsque le faisceau laser traverse deux fois l'atmosphère (à l'aller et au retour), est expliqué rigoureusement par (Artru, 2011) : réfraction liée aux variations d'indice de l'air, propagation de la lumière en partie dans l'air, ... D'autres techniques de télémétrie sont possibles (télémétrie radar). D'autres techniques plus générales de mesures de distances de corps célestes plus éloignées sont possibles aussi.

X) 3. Définitions du mot « lumière »

X) 3. i. « Lumière » (nom féminin)

Dans le Larousse, les définitions de « lumière » sont les suivantes : (1) *Rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde, comprise entre 400 et 780 nm, correspond à la zone de sensibilité de l'œil humain, entre l'ultraviolet et l'infrarouge.* ; (2) *Clarté émise par le soleil, qui éclaire les objets et les rend visibles : Laisser pénétrer la lumière dans la pièce.* ; (3) *Éclairage artificiel : Éteindre la lumière.* (4) *Source lumineuse, appareil, lampe, etc., propres à l'éclairage : Il reste une lumière allumée chez eux.* ; (5) *Éclat du regard manifestant un état, un sentiment : Une lumière d'intelligence brille dans son regard.* ; (6) *Éclaircissement, ce qui fait comprendre : Ces informations n'ont apporté aucune lumière dans le débat.* ; (7, littéraire) *Personne d'une grande intelligence, d'un savoir éclatant : Une lumière du barreau.* (8, anatomie) *Espace occupant l'intérieur*

d'un organe tubulaire (vaisseau ou autre canal de l'organisme). ; (9, armement) Ouverture pratiquée dans le canon des anciennes armes à feu et par laquelle on enflammait la charge. ; (10, arts décoratifs) Branche d'un candélabre (dont on dira qu'il est à trois, à six lumières, etc.). ; (11, beaux-arts) Partie claire, ou plus éclairée que les autres, dans un tableau, une gravure, un dessin. (Souvent au pluriel) ; (12, mécanique) Orifice ménagé dans une pièce afin d'y permettre le passage d'une autre pièce, d'un fluide, d'un outil de démontage, etc. ; (13, menuiserie) Ouverture située entre la lame et le fût d'un rabot, pour évacuer les copeaux.).

X) 3. ii. « Lumières » (nom féminin au pluriel)

Dans le Larousse, les définitions de « lumières » (avec un s) sont les suivantes : (1) *Connaissances possédées par quelqu'un sur tel sujet : J'ai besoin de vos lumières.* (2) *Feux d'un véhicule : Il a laissé ses lumières allumées.*

X) 4. Grandeurs physiques pour comprendre la caractérisation de la lumière

X) 4. i. Luminosité

● La luminosité L caractérise, de manière intrinsèque, la quantité totale d'énergie émise par unité de temps. Elle représente une puissance lumineuse et désigne ce qui s'appelle la brillance d'une source lumineuse. Le terme « éclat » existe aussi, mais la réalité est que ce mot revient à parler de luminosité apparente, fonction de la distance. La luminosité apparente renseigne donc sur la distance d'éloignement d'une source lumineuse de luminosité intrinsèque L connue (ou une chandelle standard) : plus elle est loin, plus son éclat est faible et inversement.

Analyse dimensionnelle : Watt = Joule/seconde.

Analyse dimensionnelle avec les symboles : $W = J/s$.

X) 4. ii. Flux lumineux, intensité lumineuse, éclairage lumineux

● Le flux lumineux Φ caractérise, de manière extrinsèque, la quantité totale d'énergie émise par unité de temps. Elle représente aussi une puissance lumineuse. Ce flux peut également être déterminé par le produit entre la densité de flux lumineux (φ) et la surface réceptrice (S). À la différence de la luminosité, le flux lumineux prend en compte la sensibilité de l'œil humain et

l'efficacité lumineuse spectrale (la sensibilité de l'œil humain est différente à chaque longueur d'onde du rayonnement). Elle tient compte de l'étendue géométrique solide (via l'angle solide, qui s'exprime en stéradian).

Analyse dimensionnelle : lumen = candela stéradian.

Analyse dimensionnelle avec les symboles : $\text{lm} = \text{cd} \cdot \text{sr}$.

● L'intensité lumineuse I caractérise le débit de lumière, *i.e.* la quantité de photons par unité de temps, dans une direction donnée. Elle représente une puissance lumineuse directionnelle.

Analyse dimensionnelle : candela (unité de base du SI).

Analyse dimensionnelle avec les symboles : cd (unité de base du SI).

● L'éclairement lumineux ξ caractérise une densité, la densité de flux lumineux par unité de surface, tel que : $\xi = \Phi/S$.

Analyse dimensionnelle : lux = lumen par mètre-carré.

Analyse dimensionnelle avec les symboles : $\text{lx} = \text{lm}/\text{m}^2$.

○ Ces trois grandeurs sont reliées dans la **Figure 36**.

Lumen, candela et lux

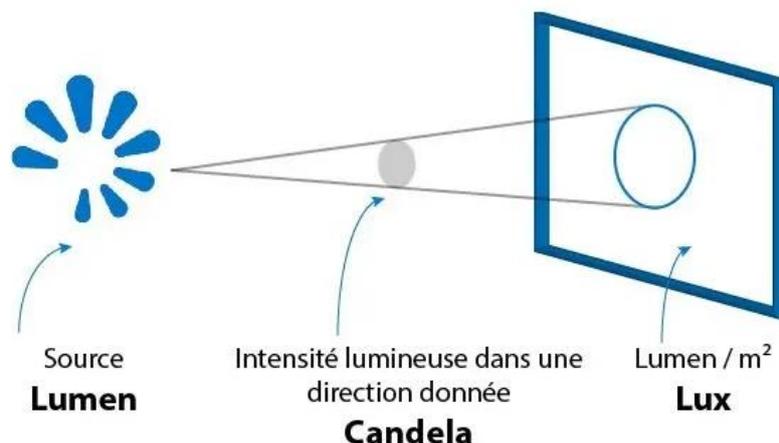


Figure 36. Lumen, candela et lux (« Lumen, candela et lux », 2020).

X) 4. iii. Luminance

● La luminance L_v caractérise la sensation visuelle de luminosité d'une surface. À la différence de l'éclairement, la luminance prend en compte le trajet des photons depuis la source (alors que l'éclairement prend en compte les photons depuis la source directement).

Analyse dimensionnelle : candela par mètre-carré.

Analyse dimensionnelle avec les symboles : cd/m².

X) 5. Conceptions de la vitesse au niveau universitaire

Au niveau universitaire, il est impossible d'enseigner la relativité restreinte sans faire de rappels sur la relativité galiléenne selon (Villani & Pacca, 1987). L'idée de mouvement absolu – alors qu'il est relatif selon le référentiel d'étude et qu'il est « encore plus relatif » (*“special relativity is much more abstract not only because it is even more relativistic”*) lorsque la vitesse d'un objet ou d'une particule s'approche de la vitesse de la lumière – est profondément ancrée chez des étudiants de Licence (*graduate*). Ces étudiants sont soumis à deux problèmes (en lien avec la contraction des longueurs et avec la dilatation du temps), après quoi (Villani & Pacca, 1987) concluent que l'invariance de la vitesse de la lumière est partiellement comprise. Il n'est pas inutile de dire que ces étudiants sont largement conscients que la vitesse de la lumière possède une valeur finie, les deux situations proposées aux étudiants sont d'un niveau relativement plus complexe que cela, néanmoins, l'important est de remarquer que des conceptions spontanées des étudiants sur la lumière, et sur la vitesse en particulier, existent même après le lycée, à des âges plus avancés. Même si ce mémoire s'intéresse aux conceptions des élèves au cycle 4, les conceptions rencontrées à tout niveau peuvent être analysées. D'ailleurs, (Uzun & Alev, 2013), à travers plusieurs questions et questionnaires à choix multiples, affirment le fait que les mêmes conceptions peuvent se retrouver dans l'éducation primaire comme dans l'éducation supérieure.

ANNEXES

« IV) Problématique et méthodologie »

X) 6. Corpus d'éditions scolaires (citations)

Corpus (Nathan)

- Physique-Chimie Cycle 4
(Azan & Collectif, 2017d).
- Physique-Chimie 5^e, 4^e, 3^e
(Azan & Collectif, 2017a), (Azan & Collectif, 2017b) et (Azan & Collectif, 2017c) pour, respectivement, la « Physique-Chimie 3^e », la « Physique-Chimie 4^e » et la « Physique-Chimie 5^e ».
- Physique-Chimie Cycle 4 – Livre du professeur
(Azan & Collectif, 2017e).

Corpus (Lelivrescolaire.fr)

- Physique-Chimie Cycle 4
(Franchot et al., 2017d).
- Physique-Chimie 5^e, 4^e, 3^e
(Franchot et al., 2017a), (Franchot et al., 2017b) et (Franchot et al., 2017c) pour, respectivement, la « Physique-Chimie 3^e », la « Physique-Chimie 4^e » et la « Physique-Chimie 5^e ».
- Physique-Chimie Cycle 4 – Livre du professeur
(*Livre du professeur - Lelivrescolaire.fr*, s. d.).

Corpus (Bordas)

- Physique-Chimie Cycle 4
(Ruffenach et al., 2017d).
- Physique-Chimie 5^e, 4^e, 3^e
(Ruffenach et al., 2017a), (Ruffenach et al., 2017b) et (Ruffenach et al., 2017c) pour, respectivement, la « Physique-Chimie 3^e », la « Physique-Chimie 4^e » et la « Physique-Chimie 5^e ».

Corpus (Hachette)

- Physique-Chimie Cycle 4
(Dulaurans et al., 2017d).
- Physique-Chimie 5^e, 4^e, 3^e

(Dulaurans et al., 2017a), (Dulaurans et al., 2017b) et (Dulaurans et al., 2017c) pour, respectivement, la « Physique-Chimie 3^e », la « Physique-Chimie 4^e » et la « Physique-Chimie 5^e ».

Chacun des livres cités est paru en 2017, correspondant au nouveau programme de la réforme de l'enseignement au collège de 2015 (projet alors porté par la ministre de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Mme. Najat Vallaud-Belkacem, sous le quinquennat du président de la République M. François Hollande). Ces manuels sont accompagnés de leurs manuels élèves de 5^e, de 4^e et de 3^e. Ceci, de manière à connaître précisément sur quelle année une notion est introduite (*e.g.* si la valeur de la vitesse de la lumière est introduite en 5^e, en 4^e ou en 3^e).

Certains livres du professeur (livres du cycle 4), en ciblant ce qui est dit sur la vitesse pour éclairer le lecteur, peuvent être mis à contribution.

ANNEXES

« V) Étude comparative de l'enseignement de la lumière »

X) 7. Critère général C1 (détails)

→ Plus de détails sur le critère C1 (**Tableau 12**).

Le **Tableau 12** quantifie, pour chaque manuel, le nombre de séquences consacrées à la lumière dans le thème 4. Les chapitres mis en *italique* ne s'adonnent pas à décrire et à édifier le concept de la lumière. Soit ces chapitres vont loin dans le concept de la lumière : par exemple, le chapitre « Utilisation des propriétés des signaux lumineux » de Nathan comporte une activité – « Quelles sont les applications des rayonnements en médecine ? » – qui initie aux rayons X en radiographie. Soit ces chapitres utilisent le concept de la lumière dans des applications : par exemple, le chapitre « Utilisation des propriétés des signaux lumineux » de Nathan comporte une activité – « Comment calculer la distance parcourue par la lumière dans l'Univers ? » – qui ne fait qu'exploiter la vitesse de la lumière, sans vraiment éduquer sur une notion nouvelle. Un réinvestissement peut contribuer à la conceptualisation.

1 + 2 = 3 séquences

- (Partie 11 : Caractériser différents types de signaux)

Chapitre 30 : Signaux lumineux et autres types de rayonnement [4 A]

1. Quels sont les différents types de rayonnement émis par le Soleil ? [AD]
2. Dans quels milieux la lumière visible se propage-t-elle ? [AE]
3. Comment se propage la lumière et comment représenter sa trajectoire ? [AE]
4. La lumière se propage-t-elle instantanément ? [AD]

- (Partie 12 : Utiliser les propriétés des signaux lumineux et sonores)

Chapitre 31 : Utilisation des propriétés des signaux lumineux [4 A]

1. Comment utiliser la lumière diffusée ? [DI]
2. Pourquoi l'énergie transportée par la lumière peut-elle présenter un danger ? [AD]
3. Quelles sont les applications des rayonnements en médecine ? [AD]
4. Comment calculer la distance parcourue par la lumière dans l'Univers ? [AD]

Chapitre 32 : Transmission de l'information [4 A]

1. Comment les informations présentes sur Internet sont-elles transmises ? [AE]
2. Comment transmettre des données à l'aide de signaux sonores ? [AD]

C1

2 + 1 = 3 séquences

- Chapitre 30 : La lumière [4 A]

1. Le principe de la vision [AD]
2. Comment observer une éclipse de soleil (*sic*) sans risques ? [AE]
3. Comment prédire la taille d'une ombre ? [AE]
4. Attention aux lasers ! [TC]

- Chapitre 31 : Vitesse de propagation des signaux [4 A]

1. La lumière a-t-elle une vitesse infinie ? [AD]
2. L'éclair et le tonnerre, à chacun sa vitesse [AD]
3. Quelle est la taille de la nébuleuse du Crabe ? [AD]
4. Quel signal pour la voiture autonome ? [TC]

- Chapitre 32 : Des signaux au-delà de la perception humaine [4 A]

1. Dans quelles conditions peut-on ne plus entendre ? [AD]
2. La lumière a-t-elle des versions infra et ultra ? [AD]
3. Les signaux radio ont-ils des points communs avec les signaux lumineux ? [AD]

4. *Quels types de signaux utilisons-nous au XXI^e siècle ? [TC]*

Bordas

2 + 2 = 4 séquences

- Chapitre 31 : Propagation de la lumière [4 A]
 1. Sources primaires et objets diffusants [AD]
 2. La propagation de la lumière [TC]
 3. Conditions de visibilité ? [DI]
 4. Théâtre d'ombres [AE]
- Chapitre 33 : Vitesse de la lumière [4 A]
 1. La vitesse de la lumière [AD]
 2. Mesure de distances [TC]
 3. La distance Terre-Lune [DI]
 4. L'unité « année-lumière » [AD]
- *Chapitre 35 : Rayonnements [4 A]*
 1. *Signaux sonores et fréquences [AD]*
 2. *Répulsif pour jardin [AE]*
 3. *Au-delà du visible [TC]*
 4. *Portable et rayonnement radio [DI]*
- *Chapitre 35 : Signal et information [4 A]*
 1. *Des signaux pour communiquer [AD]*
 2. *Quelques techniques de communication [AD]*
 3. *Le Li-Fi [DI]*
 4. *La fibre optique [AE]*

Hachette

1 séquence

- Module 8 : Les signaux lumineux et les signaux sonores [13 A]
 1. Peut-on observer une éclipse solaire depuis n'importe-où sur la Terre ? [DE]
 2. La nuit, tous les points lumineux dans le ciel sont-ils des étoiles ? [AD]
 3. La lumière des étoiles nous parvient-elles instantanément ? [AD]
 4. Comment détecter une lumière invisible ? [AE]
 5. La mesure de la distance Terre-Lune a-t-elle toujours été précise ? [AD]
 6. Pourquoi les indiens plaçaient-ils une oreille sur le sol ? [AD]
 7. Pourquoi voit-on un feu d'artifice avant de l'entendre ? [AE]
 8. Comment une chanteuse peut-elle émettre des sons différents [AE]
 9. L'être humain entend-il comme les animaux ? [AE]

- 10. Comment une chauve-souris repère-t-elle ses proies ? [AE]
- 11. Comment communiquer avec des pots de yaourt ? [AE]
- 12. Comment un SMS est-il transmis ? [AD]
- 13. Comment une information est-elle transmise depuis l'espace ? [AE]

Tableau 12. Observables du critère C1 pour quatre éditions de manuels scolaires (détails).

Des sigles renvoient aux types d'activités qui ont été repris des manuels : AD pour activité documentaire, AE pour activité expérimentale, DI pour démarche d'investigation, et TC pour tâche complexe. La DI se rapproche de l'AE mais en faisant appel, inévitablement, à une démarche scientifique (incluant problématique, hypothèses, protocole, expérience, résultats, conclusion), là où l'AE peut écarter une ou plusieurs étapes et se focaliser sur la réalisation d'une expérience proposée par le professeur. Quant à la TC, c'est une activité qui demande de mobiliser plusieurs compétences pour travailler la résolution d'un problème (la DI est un cas particulier de TC).

X) 8. Critère général C2 (détails)

→ Plus de détails sur le critère C2 (**Tableau 13**, **Tableau 14** et **Tableau 15**).

Les nombres de pages (notés littéralement *N*) correspondent à toute la séquence (activités, cours, exercices de tout type, ...) ; les pages de garde et les pages type brevet, elles, ne sont pas comptabilisées.

Manuel scolaire (Physique-Chimie Cycle 4)					
C2	Nathan				
	<table border="1"> <tr> <th>Pourcentage (%) du thème 4 occupé par la lumière par rapport au son.</th> <th>Pourcentage (%) du thème 4 par rapport aux autres thèmes.</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">50 – 66</td> <td style="text-align: center;">14</td> </tr> </table>	Pourcentage (%) du thème 4 occupé par la lumière par rapport au son.	Pourcentage (%) du thème 4 par rapport aux autres thèmes.	50 – 66	14
	Pourcentage (%) du thème 4 occupé par la lumière par rapport au son.	Pourcentage (%) du thème 4 par rapport aux autres thèmes.			
	50 – 66	14			
	Lelivrescolaire.fr				
	<table border="1"> <tr> <th>Pourcentage (%) du thème 4 occupé par la lumière par rapport au son.</th> <th>Pourcentage (%) du thème 4 par rapport aux autres thèmes.</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">50</td> <td style="text-align: center;">14</td> </tr> </table>	Pourcentage (%) du thème 4 occupé par la lumière par rapport au son.	Pourcentage (%) du thème 4 par rapport aux autres thèmes.	50	14
Pourcentage (%) du thème 4 occupé par la lumière par rapport au son.	Pourcentage (%) du thème 4 par rapport aux autres thèmes.				
50	14				

Bordas	
Pourcentage (%) du thème 4 occupé par la lumière par rapport au son.	Pourcentage (%) du thème 4 par rapport aux autres thèmes.
50	17
Hachette	
Pourcentage (%) du thème 4 occupé par la lumière par rapport au son.	Pourcentage (%) du thème 4 par rapport aux autres thèmes.
50	11

Tableau 13. Observables du critère C2 pour quatre éditions de manuels scolaires (détails n°1).

Manuel scolaire (Physique-Chimie Cycle 4)		
Nathan		
C2	<p><u>Thème 4 (50 pages)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Chapitre 29 : Signaux sonores (12 pages) - Chapitre 30 : Signaux lumineux et autres types de rayonnement (12 pages) - Transition chapitres 30 – 31 : histoire des sciences, parcours avenir (2 pages) - Chapitre 31 : Utilisation des propriétés des signaux lumineux (12 pages) - Chapitre 32 : Transmission de l’information (10 pages) - Transition après chapitre 21 : histoire des sciences, parcours avenir (2 pages) <p><u>Calculs tenant compte des deux premiers chapitres du thème :</u></p> $N(\text{Ch. 30}) / (N(\text{Ch. 29}) + N(\text{Ch. 30})) = 12 / (12 + 12) = 12 / 24 = 50 \%$ <p>50 % du thème 4 est occupé par la lumière par rapport au son.</p> <p><u>Calculs tenant compte des trois premiers chapitres du thème :</u></p> $(N(\text{Ch. 30}) + N(\text{Ch. 30} - 31) / 2 + N(\text{Ch. 31})) / (N(\text{Ch. 29}) + N(\text{Ch. 30}) + N(\text{Ch. 30} - 31) + N(\text{Ch. 31})) = (12 + 2/2 + 12) / (12 + 12 + 2 + 12) = 25 / 38 \approx 66 \%$ <p>Environ 66 % du thème 4 est occupé par la lumière par rapport au son.</p>	
	Lelivrescolaire.fr	
	<p><u>Thème 4 (55 pages)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Chapitre 29 : Le son (14 pages) - Chapitre 30 : La lumière (14 pages) - Chapitre 31 : Vitesse de propagation des signaux (14 pages) - Chapitre 32 : Des signaux au-delà de la perception humaine (13 pages) <p><u>Calculs tenant compte des deux premiers chapitres du thème :</u></p> $N(\text{Ch. 30}) / (N(\text{Ch. 29}) + N(\text{Ch. 30})) = 14 / (14 + 14) = 14 / 28 = 50 \%$	

50 % du thème 4 est occupé par la lumière par rapport au son.

Calculs tenant compte des trois premiers chapitres du thème :

$$(N(\text{Ch. 30}) + N(\text{Ch. 31})/2)/(N(\text{Ch. 29}) + N(\text{Ch. 30}) + N(\text{Ch. 31})) = (14 + 14/2)/(14 + 14 + 14) = 21/42 = 50 \%$$

50 % du thème 4 est occupé par la lumière par rapport au son.

Bordas

Thème 4 (72 pages)

- Chapitre 31 : Propagation de la lumière (12 pages)
- Chapitre 32 : Propagation du son (12 pages)
- Chapitre 33 : Vitesse de la lumière (12 pages)
- Chapitre 34 : Vitesse du son (12 pages)
- Chapitre 35 : Rayonnements (12 pages)
- Chapitre 36 : Signal et information (12 pages)

Calculs tenant compte des quatre premiers chapitres du thème :

$$(N(\text{Ch. 31}) + N(\text{Ch. 33}))/N(\text{Ch. 31}) + N(\text{Ch. 32}) + N(\text{Ch. 33}) + N(\text{Ch. 34}) = (12 + 12)/(12 + 12 + 12 + 12) = 24/48 = 50 \%$$

50 % du thème 4 est occupé par la lumière par rapport au son.

Calculs tenant compte des cinq premiers chapitres du thème :

$$(N(\text{Ch. 31}) + N(\text{Ch. 33}) + N(\text{Ch. 35})/2)/N(\text{Ch. 31}) + N(\text{Ch. 32}) + N(\text{Ch. 33}) + N(\text{Ch. 34}) + N(\text{Ch. 35}) = (12 + 12 + 12/2)/(12 + 12 + 12 + 12 + 12/2) = 30/60 = 50 \%$$

50 % du thème 4 est occupé par la lumière par rapport au son.

Hachette

Thème 4 (50 pages)

- Module 8 : Les signaux lumineux et les signaux sonores (36 pages)
 - Activités 1, 2, 3, 4, 5, 7 en lien avec les signaux lumineux (6 pages)
 - Activités 6, 7, 8, 9, 10, 11 en lien avec les signaux sonores (6 pages)
 - Activités 12 et 13 en lien avec la transmission des signaux (2 pages)
 - Cours (2 pages)
 - Exercices (préparation brevet et accompagnement personnalisé) (20 pages)

Calculs tenant compte des onze premières activités :

$$N(\text{Act. 1, 2, 3, 4, 5, 7})/N(\text{ct. 1, 2, 3, 4, 5, 7}) + N(\text{ct. 6, 7, 8, 9, 10, 11}) = 6/(6 + 6) = 6/12 = 50 \%$$

50 % du thème 4 est occupé par la lumière par rapport au son.

Calculs tenant compte des treize activités :

$$(N(\text{Act. 1, 2, 3, 4, 5, 7}) + N(\text{Act. 12, 13})/2)/N(\text{ct. 1, 2, 3, 4, 5, 7}) + N(\text{ct. 6, 7, 8, 9, 10, 11}) + N(\text{Act. 12, 13}) = (6 + 2/2)/(6 + 6 + 2) = 7/14 = 50 \%$$

50 % du thème 4 est occupé par la lumière par rapport au son.

Tableau 14. Observables du critère C2 pour quatre éditions de manuels scolaires (détails n° 2).

Manuel scolaire (Physique-Chimie Cycle 4)

Nathan

Nombre total de pages : 432.

Nombre total de pages pour les 4 thèmes : 410.

- Thème 1 : Organisations et transformations de la matière (172 pages)
- Thème 2 : Mouvement et interaction (52 pages)
- Thème 3 : L'énergie et ses conversions (128 pages)
- Thème 4 : Des signaux pour observer et pour communiquer (58 pages)

Calcul du rapport :

$$N(\text{thème 4})/N(\text{thèmes 1, 2, 3, 4}) = 58/(172 + 52 + 128 + 58) = 58/410 \approx 14 \%$$

Environ 14 % du programme disciplinaire est occupé par le thème 4 par rapport aux autres thèmes.

Lelivrescolaire.fr

Nombre total de pages : 464.

Nombre total de pages pour les 4 thèmes : 421.

- Thème 1 : Organisations et transformations de la matière (185 pages)
- Thème 2 : Mouvement et interaction (60 pages)
- Thème 3 : L'énergie et ses conversions (116 pages)
- Thème 4 : Des signaux pour observer et pour communiquer (60 pages)

Calcul du rapport :

$$N(\text{thème 4})/N(\text{thèmes 1, 2, 3, 4}) = 60/(185 + 60 + 116 + 60) = 60/421 \approx 14 \%$$

Environ 14 % du programme disciplinaire est occupé par le thème 4 par rapport aux autres thèmes.

Bordas

Nombre total de pages : 480.

Nombre total de pages pour les 4 thèmes : 432.

- Thème 1 : Organisations et transformations de la matière (168 pages)
- Thème 2 : Mouvement et interaction (60 pages)
- Thème 3 : L'énergie et ses conversions (132 pages)
- Thème 4 : Des signaux pour observer et pour communiquer (72 pages)

Calcul du rapport :

$$N(\text{thème 4})/N(\text{thèmes 1, 2, 3, 4}) = 72/(168 + 60 + 132 + 72) = 72/432 \approx 17 \%$$

Environ 17 % du programme disciplinaire est occupé par le thème 4 par rapport aux autres thèmes.

C2

Nombre total de pages : 418.

Nombre total de pages pour les 4 thèmes : 350.

- Thème 1 : Organisations et transformations de la matière (136 pages)
- Thème 2 : Mouvement et interaction (80 pages)
- Thème 3 : L'énergie et ses conversions (96 pages)
- Thème 4 : Des signaux pour observer et pour communiquer (38 pages)

Calcul du rapport :

$$N(\text{thème 4})/N(\text{thèmes 1, 2, 3, 4}) = 38/(136 + 80 + 96 + 38) = 38/350 \approx 11 \%$$

Environ 11 % du programme disciplinaire est occupé par le thème 4 par rapport aux autres thèmes.

Tableau 15. Observables du critère C2 pour quatre éditions de manuels scolaires (détails n° 3).

X) 9. Critère général C3 (détails)

→ Plus de détails sur le critère C3.

- Pour Nathan :
 - o Un premier chapitre sur : signaux sonores + vitesse du son.
 - o Un deuxième chapitre sur : signaux lumineux + vitesse de la lumière.
- Pour Lelivrescolaire.fr :
 - o Un premier chapitre sur : signaux sonores.
 - o Un deuxième chapitre sur : signaux lumineux.
 - o Un troisième chapitre sur : vitesse de la lumière + vitesse du son.
- Pour Bordas :
 - o Un premier chapitre sur : signaux lumineux.
 - o Un deuxième chapitre sur : vitesse de la lumière.
 - o Un troisième chapitre sur : vitesse du son.
 - o Un quatrième chapitre sur : signaux sonores.
- Pour Lelivrescolaire.fr :
 - o Un premier chapitre sur : signaux lumineux.
 - o Un deuxième chapitre sur : signaux sonores.
 - o Un troisième chapitre sur : vitesse de la lumière.
 - o Un quatrième chapitre sur : vitesse du son.

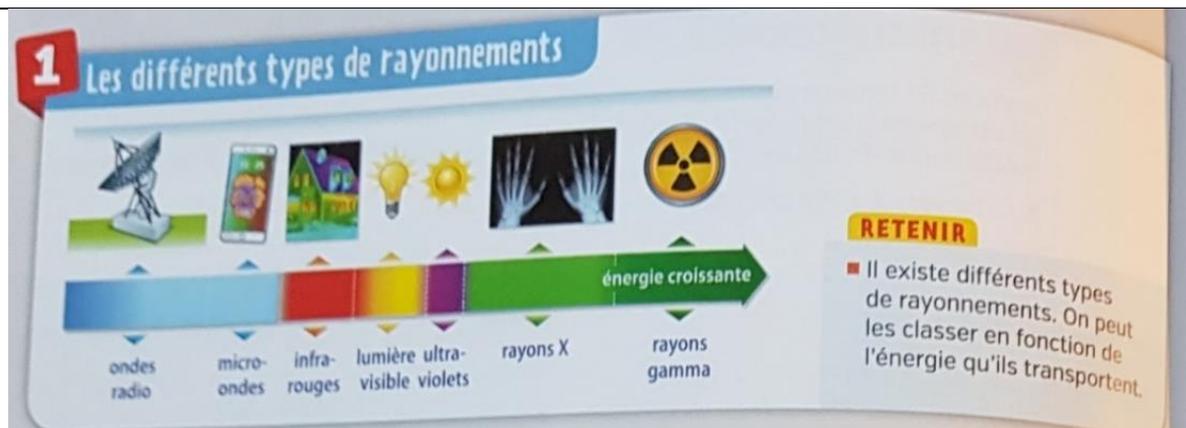
X) 10. Critère sur le modèle du rayon lumineux C4 (détails)

→ Plus de détails sur le critère C4 (Tableau 16).

Manuel scolaire (Physique-Chimie Cycle 4)

Nathan

Définition du cours (« L'ESSENTIEL »)



Lelivrescolaire.fr

Définition du cours (« BILAN »)

C4

2 Lumières invisibles

- › L'œil est un récepteur de lumière visible. Il existe aussi de la lumière infrarouge et ultraviolette que nos yeux ne détectent pas.
- › Comme le son, la lumière, qu'elle soit visible ou non, est créée par une source et se propage en ligne droite à travers certains matériaux.

Les ultraviolets et les infra-rouges sont des lumières que l'œil ne détecte pas.

3 Ondes électromagnétiques

- › La lumière et les ondes électromagnétiques (comprenant les ondes radio, aussi appelées ondes hertziennes) sont de même nature. Elles sont produites par un émetteur et sont ensuite détectées par un récepteur.
- › Elles se propagent en ligne droite dans l'air, mais aussi dans le vide et dans certains matériaux.

Même si l'œil ne les détecte pas, les ondes radios et les autres ondes électromagnétiques sont de même nature que la lumière et se propagent dans le vide.

Bordas

Définition du cours (« Cours »)

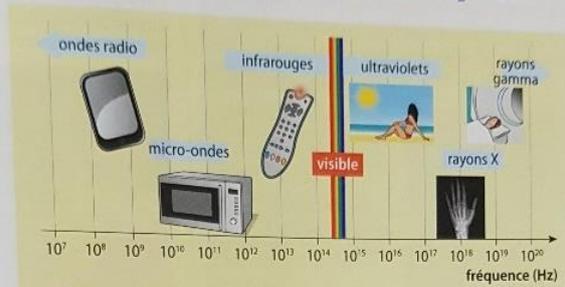
2 Les rayonnements électromagnétiques

OBJECTIF 2

Les rayonnements électromagnétiques sont utilisés dans différents domaines : les rayons X et rayons gamma sont utilisés en médecine, les ondes radio dans la télécommunication, etc.

La fréquence caractérise le type de rayonnement électromagnétique.

La lumière est un rayonnement électromagnétique visible par l'œil humain.



La fréquence caractérise le type de rayonnement électromagnétique.

La lumière s'étale du rouge (4×10^{14} Hz) au violet (8×10^{14} Hz). Au-delà du violet, les ultraviolets (UV), présents notamment dans le rayonnement solaire, participent au bronzage et peuvent être dangereux pour la peau. En deçà du rouge, les infrarouges (IR) sont émis par les corps chauds ou les télécommandes.

3 Nature des rayonnements

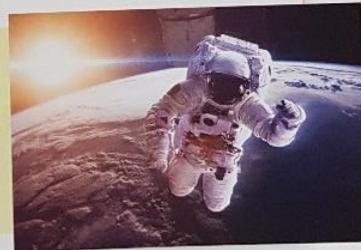
OBJECTIF 3

Les rayonnements sonores ont besoin d'un milieu matériel élastique pour se propager, à la différence des rayonnements électromagnétiques, qui peuvent se déplacer dans le vide.

La vitesse de propagation des rayonnements sonores est beaucoup plus faible que celle des rayonnements électromagnétiques.

Les rayonnements sonores ne sont pas de même nature que les rayonnements électromagnétiques.

Dans le vide de l'espace, la lumière se propage.



Je retiens l'essentiel

OBJECTIF 1

La fréquence d'un signal sonore est le nombre de vibrations par seconde du milieu de propagation. Les ultrasons et les infrasons ont des fréquences qui les rendent inaudibles pour l'oreille humaine.

OBJECTIF 2

La lumière visible, les UV, les IR, les ondes radio, les micro-ondes et les rayons X ou gamma sont des rayonnements électromagnétiques.

OBJECTIF 3

Les rayonnements sonores et les rayonnements électromagnétiques sont de natures différentes.

Les mots du chapitre

Rayonnement : propagation d'un signal émis par une source.

Fréquence d'un signal : grandeur associée à la vibration du signal, qui s'exprime en hertz (Hz).

Rayonnements électromagnétiques : signaux de même nature que la lumière mais qui peuvent être de fréquences différentes.

Chapitre 35 • Rayonnements 427

Hachette

Définition du cours (« BILAN de la fin de cycle »)

Les rayonnements visibles et invisibles

- Certains rayonnements lumineux ne sont pas visibles par l'œil humain comme les rayonnements infrarouges (IR) ou ultraviolets (UV).
- Une exposition prolongée à certains de ces rayonnements est dangereuse pour l'Homme.



Exemple : Une télécommande utilise des rayonnements IR.

Tableau 16. Observables du critère C4 pour quatre éditions de manuels scolaires (détails).

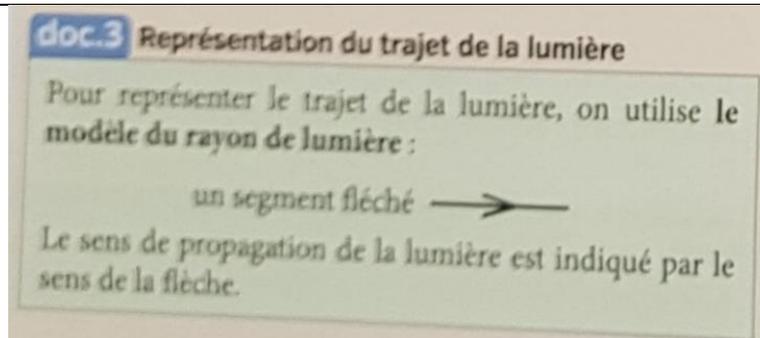
X) 11. Critère sur le modèle du rayon lumineux C5 (détails)

→ Plus de détails sur le critère C5 (Tableau 17).

Manuel scolaire (Physique-Chimie Cycle 4)

Nathan

Première apparition du modèle



Activité « Comment se propage la lumière et comment représenter sa trajectoire ? »

Chapitre 30 : Signaux lumineux et autres types de rayonnement

Définition du modèle dans le cours



C5

Lelivrescolaire.fr

Première apparition du modèle

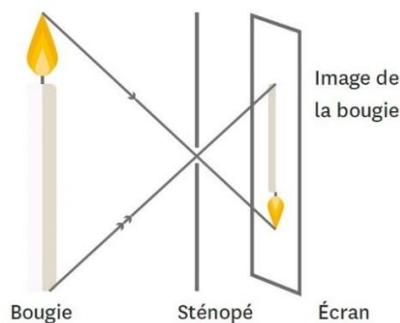


Image tirée du livre du professeur.

Activité « Comment observer une éclipse de soleil (sic) sans risques ? »

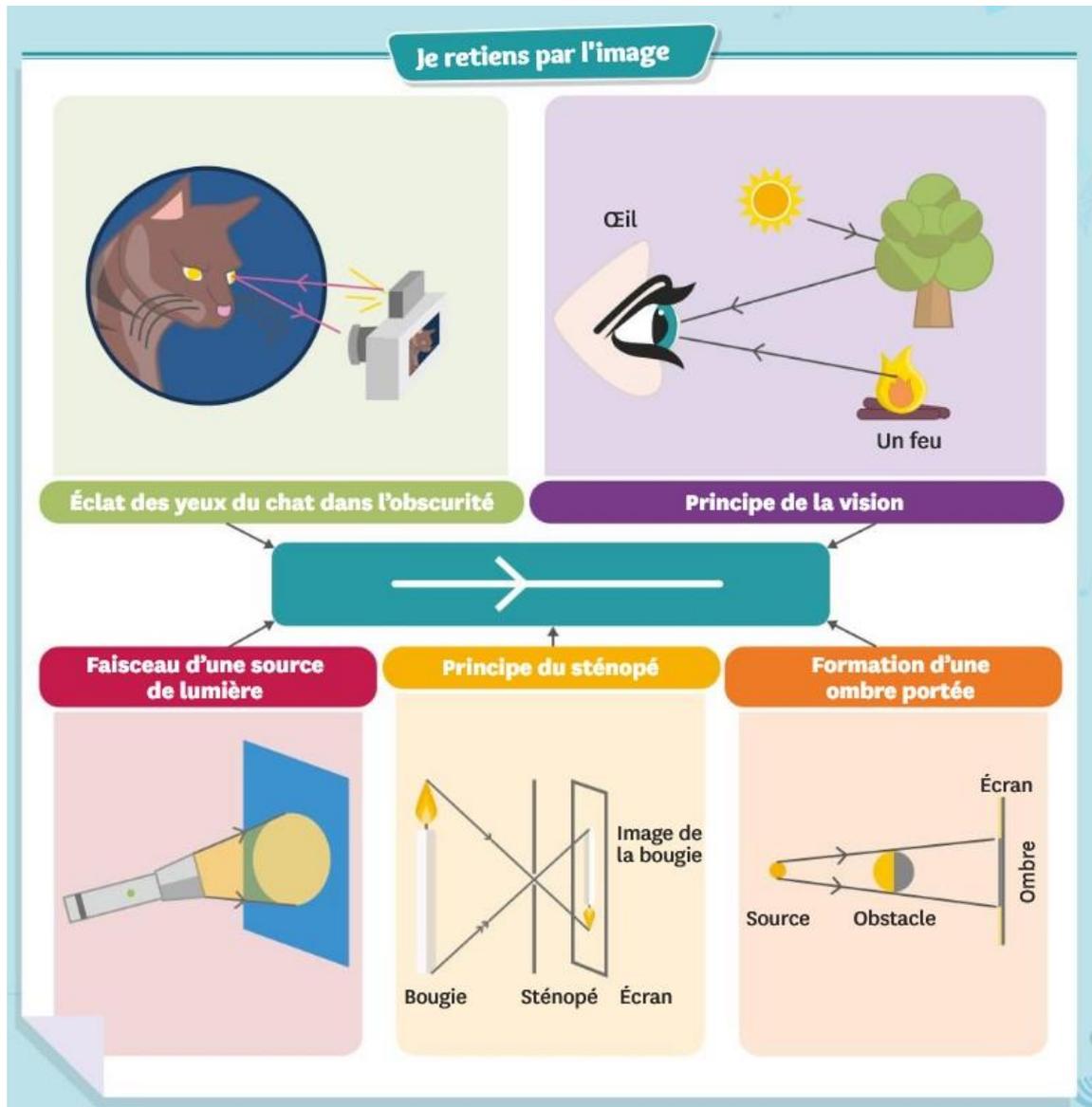
Chapitre 30 : La lumière

Définition du modèle dans le cours

2 La trajectoire de la lumière dans l'air

- La lumière se propage de manière rectiligne (en ligne droite), on la représente donc par un **rayon de lumière**.
- Un **faisceau** de lumière est un ensemble de rayons de lumière provenant de la même source. Il peut être représenté par les deux rayons correspondant à ses limites.

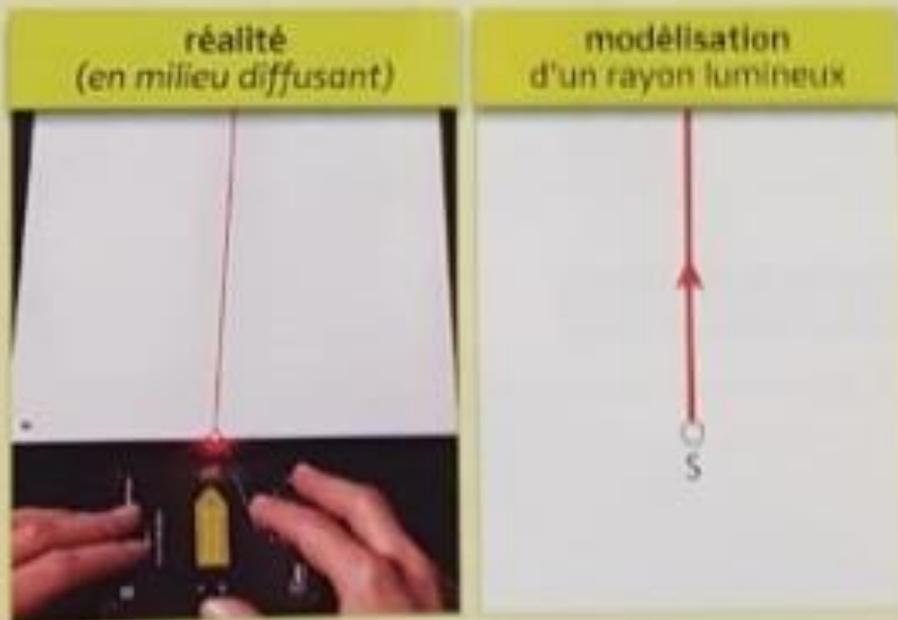
Pour représenter le trajet de la lumière, on utilise une droite fléchée appelée rayon de lumière.



Bordas

Première apparition du modèle

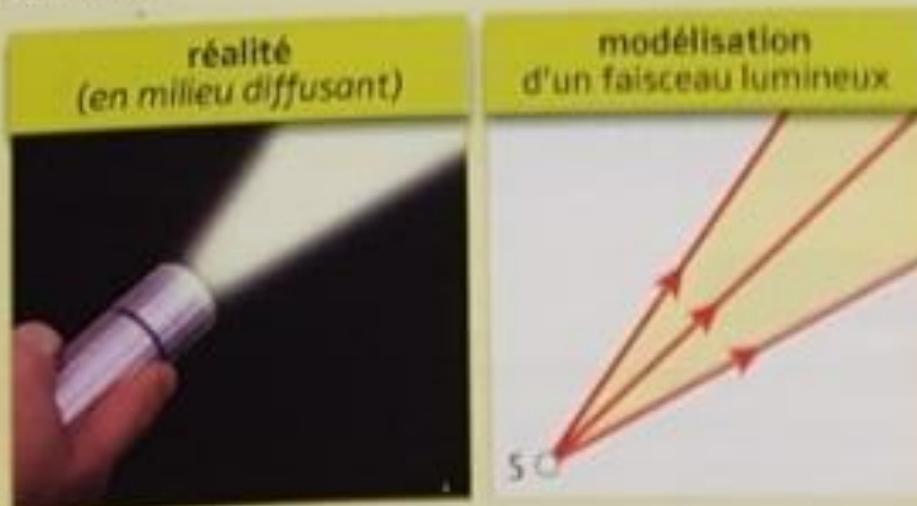
- Un **rayon lumineux** est une représentation (une « modélisation ») du trajet de la lumière par un segment fléché.



La source primaire de lumière est représentée par un **point** noté S : ○

La **direction** du segment fléché et son **sens** traduisent ceux de la propagation de la lumière.

- Un **faisceau de lumière** est un ensemble de rayons lumineux.



Doc. 3 Modèle du rayon lumineux

Activité « La propagation de la lumière »

Chapitre 31 : Propagation de la lumière

OBJECTIF 2

2 Propagation de la lumière

Milieux de propagation
La lumière peut se propager dans des milieux transparents (l'air, l'eau, le vide de l'espace...).

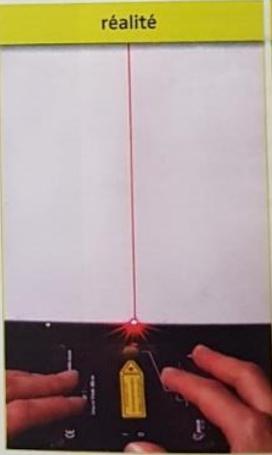
Propagation rectiligne
Dans un milieu transparent et homogène, la lumière se propage de manière rectiligne, c'est-à-dire en ligne droite.

Généralement, le trajet suivi par la lumière n'est pas visible à l'œil. On peut cependant le représenter.

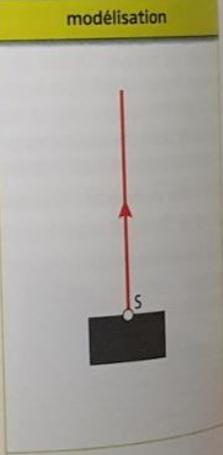
Le **rayon lumineux** est une modélisation du trajet suivi par la lumière.

Le rayon lumineux est un **segment de droite fléché**.
Sa direction et son sens traduisent ceux de la propagation de la lumière.
Son origine, notée S, est la source de lumière.

réalité



modélisation



Dangers du laser 

Le laser est une source de lumière dangereuse pour les yeux, pouvant même provoquer la cécité. Il faut donc respecter les règles de sécurité d'utilisation : ne jamais diriger le laser vers les yeux ; ne jamais se placer sur le trajet du faisceau lumineux ; porter des lunettes de protection adaptées.

Hachette

Première apparition du modèle

Doc. 1 Propagation de la lumière

- Un laser est une source lumineuse qui envoie un faisceau de lumière dans une direction déterminée et dans un espace limité.
 - Pour visualiser le trajet de la lumière émise par le laser, on utilise de la fumée ou des gouttelettes d'eau.
 - Il est dangereux de regarder directement la lumière émise par un laser ; on ne l'oriente pas vers une personne.
- 
- 

DANGER
Rayonnement LASER

Activité « Peut-on observer une éclipse solaire depuis n'importe où sur la Terre ? »

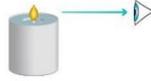
Module 8 : Les signaux lumineux et les signaux sonores

Définition du modèle dans le cours

1 Les signaux lumineux

Les sources de lumière et la vision des objets

- Voir un objet, c'est recevoir dans les yeux de la lumière provenant de cet objet.
- Les **sources primaires**, comme un réverbère allumé, émettent leur propre lumière.
- Les **objets diffusants**, comme la Lune, renvoient dans toutes les directions une partie de la lumière qu'ils reçoivent.



La propagation de la lumière

- La lumière se propage en ligne droite dans un milieu transparent. On dit que la propagation de la lumière est rectiligne.



Exemple : Les rayons lumineux qui traversent les nuages se propagent en ligne droite.

- Le trajet suivi par la lumière est modélisé par un **rayon lumineux**. On le représente par une demi-droite fléchée qui part de la source.



Tableau 17. Observables du critère C5 pour quatre éditions de manuels scolaires (détails).

X) 12. Critère sur la vitesse de la lumière C6 (détails)

→ Plus de détails sur le critère C6 (Tableau 18).

Manuel scolaire (Physique-Chimie Cycle 4)

Nathan

Manuel de l'élève

C6

4 Activité documentaire

La lumière se propage-t-elle instantanément ?

Jusqu'au 17^e siècle, les astronomes s'opposent : certains (comme Jean-Dominique Cassini, un astronome français) pensent que la lumière se propage instantanément, d'autres pensent qu'elle met du temps à se déplacer.

► La lumière a-t-elle une vitesse ?

doc.1 Le problème de Cassini

En 1671, Cassini détermine les jours et horaires des éclipses de Io, un satellite de Jupiter. Mais il rencontre un problème : ses prévisions (basées uniquement sur le mouvement des astres) ne sont pas toujours exactes. Il constate parfois un écart de plusieurs minutes entre l'éclipse et l'horaire prévu. Romer, un astronome danois, parvient à résoudre le problème de Cassini.

doc.2 Les observations de Romer

Romer observe Io à travers un télescope. Lorsque Io devient visible, c'est-à-dire lorsque Io sort du cône d'ombre de Jupiter (zone derrière Jupiter non éclairée par le Soleil), Romer note le jour et l'heure. Quand on voit Io à travers un télescope, c'est parce que la lumière du Soleil réfléchi par Io a traversé l'espace jusqu'au télescope. Romer réalise un croquis (doc.3) afin de comparer la distance parcourue par la lumière réfléchi par Io et atteignant la Terre à deux dates différentes de l'année 1676.

Lien 15.1

A : Jupiter en août 1676
B : Terre en août 1676
C : Io en août 1676
D : Jupiter en novembre 1676
E : Terre en novembre 1676
F : Io en novembre 1676

doc.3 Distance parcourue par la lumière réfléchi par Io et atteignant la Terre à deux dates différentes de l'année 1676

Le faisceau lumineux indique le trajet de la lumière du Soleil réfléchi par Io et qui arrive jusqu'à la Terre.

4. Déduire des observations de Romer si la lumière a une vitesse.

5. Expliquer comment Romer a résolu le problème rencontré par Cassini en utilisant les mots :

- lumière
- vitesse
- distance
- durée

1. Décrire le trajet effectué par Jupiter entre août et novembre 1676.

2. Décrire le trajet effectué par la Terre entre août et novembre 1676.

3. Comparer les distances que parcourt la lumière entre Io et la Terre en août puis en novembre 1676.

CHAPITRE 15 Signaux lumineux et autres types de rayonnements | 171

Activité 4
La lumière se propage-t-elle instantanément ?
 Lien avec le programme :
 Lumière : propagation, vitesse de propagation.

Commentaires
 La notion de vitesse finie de la lumière est introduite par le débat scientifique connu au 17^e siècle. La comparaison des distances parcourues par la lumière depuis Io, satellite de Jupiter, jusqu'à la Terre à deux dates différentes de l'année 1676 a permis à Römer de proposer une explication au problème de Cassini. Il propose de tenir compte du fait que la lumière a besoin de temps pour se propager depuis Io, et que de ce fait sa vitesse n'est pas infinie.

J'exploite des documents scientifiques

- Entre août 1676 et novembre 1676, Jupiter est passé de la position A à la position D. Il s'est déplacé sur son orbite autour du Soleil.
- Entre août 1676 et novembre 1676, la Terre est passée de la position B à la position E. Elle s'est déplacée sur son orbite autour du Soleil.
- Entre août 1676 et novembre 1676, la distance parcourue par la lumière depuis Io jusqu'à la Terre a changé. En août, cette distance est représentée par le segment [BC]. En novembre, cette distance est représentée par le segment [EF]. Sur le schéma, on voit que la distance EF est supérieure à la distance BC.

4. La distance parcourue par la lumière depuis Io jusqu'à la Terre a changé entre août et novembre 1676. Si la lumière se déplaçait instantanément, alors Io devrait sortir du cône d'ombre de Jupiter aux horaires prévus avec grande précision par Cassini. La lumière a donc une vitesse finie (non infinie), elle met du temps à se déplacer. Si la distance qu'elle doit parcourir depuis Io change, alors la durée nécessaire à la propagation de la lumière depuis Io va changer aussi.

Je communique avec un langage scientifique

5. La lumière a une vitesse qui n'est pas infinie. Elle met une certaine durée pour parcourir la distance entre Io et la Terre.

ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE
 ■ COMPÉTENCE Lire et comprendre des documents scientifiques pour en extraire des informations

1 La lumière a-t-elle une vitesse infinie ?

Elieot découvre dans une revue scientifique la valeur de la vitesse de la lumière : 300 000 000 m/s. Il la trouve stupéfiante et se dit que ça ne fait pas de réelle différence avec une vitesse vraiment infinie.

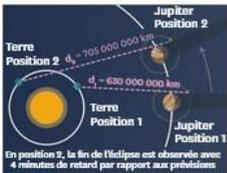
Comment les scientifiques ont-ils prouvé que la lumière n'a pas une vitesse infinie ?

La lumière met environ 1 milliardième de seconde pour aller de ce texte à votre œil. À cause de la difficulté à mesurer une durée si courte, les scientifiques ont cru pendant des siècles que la lumière se propageait instantanément. Au début du XVII^e siècle, Galilée pense le contraire mais n'arrive pas à le prouver. C'est Ole Römer qui y parviendra en 1676. De nos jours on sait que la vitesse de la lumière vaut exactement 299 792 458 m/s.

Doc. 1 Une vitesse vertigineuse.

En 1676, Ole Römer étudie les éclipses d'Io. Ce satellite de Jupiter n'est plus visible lorsqu'il traverse la zone d'ombre de Jupiter. Ces éclipses sont bien connues mais ne respectent bizarrement pas toujours les horaires prévus par les calculs... Römer prouve que ces variations ne peuvent correspondre qu'au temps supplémentaire que met la lumière d'Io pour nous parvenir quand Jupiter et elle sont plus éloignées de la Terre : la lumière a donc une vitesse finie !

Doc. 2 Ole Römer prouve le caractère fini de la vitesse de la lumière.



Römer ne connaissait pas précisément les distances indiquées sur ce schéma et préféra donc ne pas calculer la vitesse de la lumière en risquant d'être imprécis.

Doc. 3 Des dispositions différentes d'une fin d'éclipse à l'autre.

Exploration et analyse des documents

- Doc. 1** Qui est le premier scientifique à avoir voulu prouver que la lumière n'a pas une vitesse infinie ?
- Doc. 2 et 3** En position 2, la lumière diffusée par Io doit parcourir une distance plus grande pour atteindre la Terre. Calcule la différence par rapport à la position 1.
- Calcule la vitesse de la lumière qu'aurait obtenu Römer avec les données disponibles sur le schéma.

Synthèse

- Quel pourcentage d'erreur sur la vitesse de la lumière aurait fait Römer avec de telles données ?

NUMÉRIQUE
 Coup de pouce

Vocabulaire
 Une **éclipse** : inobservabilité momentanée d'un astre dans le ciel.

Pour réussir cette activité

- ✓ J'ai compris l'origine des variations d'horaires des éclipses d'Io.
- ✓ J'ai calculé une valeur approximative de la vitesse de la lumière.

416

1 ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE

La lumière a-t-elle une vitesse infinie ?



■ Présentation

L'objectif de cette activité est de permettre aux élèves de comprendre comment Römer a découvert que la vitesse de la lumière n'est pas infinie contrairement à ce que l'on a longtemps pensé, tant sa valeur est grande.

■ Temps prévu

- › Temps total : 30 min environ
- Découverte de la situation déclenchante et des documents : 5 min
- Exploration et analyse des documents : 10 min
- Synthèse : 5 min
- Mise en commun et institutionnalisation : 10 min

■ Liens avec le programme

BO

- › Lumière : vitesse de propagation.
- Utiliser l'unité « année-lumière » comme unité de distance.

› Si le programme ne mentionne pas la valeur de la vitesse de la lumière comme une donnée que les élèves doivent avoir mémorisée, le fait que la lumière ait une vitesse qui n'est pas infinie y est mentionnée et permet de comprendre la notion de l'année-lumière, également énoncée.

› L'activité permet de travailler la compétence suivante du domaine 1 :

■ **COMPÉTENCE** Lire et comprendre des documents scientifiques pour en extraire des informations

Autre compétence possible :

- Pratiquer le calcul numérique et le calcul littéral

■ Pour répondre à la problématique

La problématique apporte une réponse à la question donnée en titre de l'activité et la prolonge sur ce qui va réellement demander un effort aux élèves : comprendre la méthode utilisée pour arriver au résultat annoncé. Les élèves peuvent donc prendre connaissance des documents en ayant leur attention tournée vers ce qui doit être retenu.

■ Document(s)

- › **Doc. 1 :** Le document résume rapidement l'histoire de la mesure de la vitesse de la lumière et présente deux scientifiques qui y ont contribué : Galilée et Römer.
- › **Doc. 2 :** Le document explique comment Römer a interprété les différences entre les horaires prévus et les horaires observés des éclipses d'Io.
- › **Doc. 3 :** Le document illustre la variation de distance entre Jupiter et la Terre entre deux observations d'éclipses d'Io.



Exploration et analyse des documents

1. Le premier scientifique qui a tenté de mesurer la vitesse de la lumière est Galilée.
2. La différence entre ces deux distances est :
 $d_2 - d_1 = 705\,000\,000 - 630\,000\,000 = 75\,000\,000$ km.
 La lumière parcourt donc une distance supplémentaire de 75 000 000 km dans la position 2, par rapport à la position 1.
3. La lumière met 4 minutes de plus pour parcourir les 75 000 000 km, d'après le document 3.
 $t = 4 \text{ min} = 240 \text{ s}$

$$v = \frac{d}{t}$$

$$v = \frac{75\,000\,000}{240}$$

$$v = 312\,500 \text{ km/s}$$
 Römer aurait trouvé une vitesse de la lumière de 312 500 km/s soit 312 500 000 m/s.



Synthèse

4. La différence entre la vitesse obtenue grâce aux données disponibles et celle connue aujourd'hui est de
 $312\,500\,000 - 299\,792\,458 = 12\,707\,542$ m.
 Comparée à la vitesse réelle, cela fait $\frac{12\,707\,542}{299\,792\,458} = 0,04$, c'est-à-dire 4 %.
 Römer aurait fait une erreur d'environ 4 % sur la vitesse de la lumière.

■ Les indicateurs de réussite

- ✓ Comprendre l'origine des variations d'horaires des éclipses d'Io
- ✓ Calculer la vitesse approximative de la vitesse de la lumière

L'élève a compris :

- › qu'il faut que la lumière d'Io voyage jusqu'à la Terre pour que la fin de l'éclipse soit observée sur Terre ;
- › que la distance variant d'une position à l'autre, la durée entre la fin de l'éclipse et son observation sur Terre change selon les situations.
- › calculé la différence de distance Terre-Io d'une situation à l'autre ;
- › converti le décalage de 4 minutes en secondes avant de calculer la vitesse.

Ressources

- › Vidéo sur l'histoire de la mesure de la vitesse de la lumière : https://www.youtube.com/watch?v=GFvY1_EevWU

Activité 1

Activité de découverte

OBJECTIF 1

La vitesse de la lumière

Étude de documents



La lumière est une onde électromagnétique qui se déplace dans différents milieux transparents à des vitesses finies. Elle met par exemple 8 minutes et 20 secondes pour nous parvenir depuis le Soleil.

La vitesse de la lumière dépend du milieu de propagation. En effet, elle ne se déplace pas à la même vitesse dans l'air et dans l'eau par exemple.

Milieu	Vitesse (km/s)
vide	299 792
air	299 792
eau	225 563
verre	200 000
diamant	123 967

Pour simplifier, on peut dire que la lumière se propage dans le vide et dans l'air à une vitesse d'environ 300 000 km/s.

Doc. 1 Vitesse de propagation de la lumière

Exploitation des documents

D1.3 Je lis et je comprends

- Donner le nom du ou des milieux dans lesquels la lumière se déplace le plus rapidement.
- Donner sa valeur en km/s.
- Préciser à partir de quelle observation il a été prouvé que la lumière a une vitesse finie.
- Donner une utilisation de la rapidité de la vitesse de la lumière.

398 Des signaux pour observer et communiquer

Pendant des milliers d'années, les hommes pensaient que la propagation de la lumière était instantanée et qu'elle n'avait donc pas de vitesse finie. Ibn Al-Haytham, ou Alhazen, scientifique arabe des X^e-XI^e siècles après J.-C., a été le premier à penser que la lumière se propageait à une vitesse finie. Il n'a néanmoins jamais pu le prouver ni en calculer la vitesse.



Galilée (1564-1642) est le premier scientifique à tenter de mesurer la vitesse de la lumière, mais sans succès car elle est trop grande pour les moyens dont il dispose.



C'est finalement Oläus Roemer (1644-1710) qui prouve que la vitesse de la lumière a une valeur finie. Il justifie son hypothèse à partir d'observations de Io, un satellite naturel de Jupiter, qui peut apparaître en avance ou en retard par rapport aux prévisions selon les positions respectives de la Terre, du Soleil et de Jupiter.

James Bradley (1693-1762) confirme l'hypothèse de Roemer et estime la vitesse de la lumière à 300 000 km/s grâce à la distance Terre-Soleil.

Doc. 2 La mesure de la vitesse de la lumière



La rapidité de la lumière est utilisée pour transmettre des données, des informations et des communications, par le biais de la fibre optique par exemple. Des impulsions lumineuses sont envoyées à l'intérieur des fibres optiques, dans lesquelles elles se déplacent à la vitesse de la lumière.

Doc. 3 Utilisation de la vitesse de la lumière

La lumière des étoiles nous parvient-elle instantanément ?

Chez soi, lorsqu'on appuie sur un interrupteur, la lumière semble apparaître instantanément. On a longtemps cru que les phénomènes lumineux étaient instantanés : il y avait de la lumière ou il n'y en avait pas... C'est le savant arabe Alhazen, au ^x siècle, qui est le premier à douter de son instantanéité, mais c'est Galilée, au ^{xvii} siècle, qui est le premier à tenter d'en mesurer la vitesse de propagation. On sait maintenant que la lumière se propage dans le vide à la vitesse de 300 000 km/s.

Doc. 1 Quelques objets de l'Univers



La lumière émise par le Soleil met environ huit minutes pour nous parvenir.



La lumière émise par les étoiles de la Voie lactée les plus éloignées, met environ 100 000 années pour nous parvenir.



Photographie d'une partie de l'Univers prise par le satellite Hubble. La lumière émise par les étoiles les plus éloignées que l'on peut observer, met environ 10^{11} années pour nous parvenir.

Doc. 2 L'année-lumière

- Sur Terre, les plus grandes distances sont souvent exprimées en kilomètre.
- Les astronomes utilisent notamment une autre unité pour exprimer les distances dans l'Univers : l'année-lumière.
- L'année-lumière est la distance parcourue par la lumière en un an. Si l'on observe un objet céleste situé à une distance de 10 années-lumière, la lumière a mis 10 ans pour nous parvenir.
- Une année-lumière est égale à $9,5 \times 10^{12}$ km.

Démarche documentaire

Domaine 1 : Lire et comprendre des documents scientifiques.

Domaine 5 : Identifier les différentes échelles de structuration de l'Univers.

10

1 À l'aide du doc. 2, exprimer, en année-lumière, les distances qui nous séparent des étoiles de la Voie lactée et de l'Univers les plus éloignées (doc. 1).

Coup de pouce p. 406

2 Calculer, en kilomètre, la distance qui nous sépare des étoiles de la Voie lactée les plus éloignées (doc. 2).

Coup de pouce p. 406

3 La lumière des étoiles nous parvient-elle instantanément ?

Un pas vers le bilan

- Pourquoi utilise-t-on l'année-lumière pour évaluer des distances en astronomie ?

Prolongement

L'étoile la plus proche du Système solaire est Proxima du Centaure. Elle est située à 4×10^{13} km. Combien de temps la lumière met-elle pour nous parvenir de Proxima du Centaure ?

Coup de pouce p. 406

Tableau 18. Observables du critère C6 pour quatre éditions de manuels scolaire (détails).

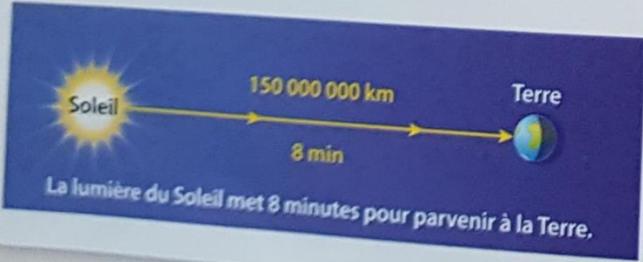
X) 13. Critère sur la vitesse de la lumière C7 (détails)

→ Plus de détails sur le critère C7 (Tableau 19).

Manuel scolaire (Physique-Chimie Cycle 4)

Nathan

4 La vitesse de La lumière



150 000 000 km
8 min

Soleil Terre

La lumière du Soleil met 8 minutes pour parvenir à la Terre.

REtenir

- La lumière ne se déplace pas instantanément, elle met donc une certaine durée pour parcourir une distance.
- La vitesse de la lumière dans le vide et l'air est **300 000 km/s**.

Remarque : La valeur de la vitesse de la lumière dépend du milieu traversé.

Des signaux pour observer et communiquer

Lelivrescolaire.fr

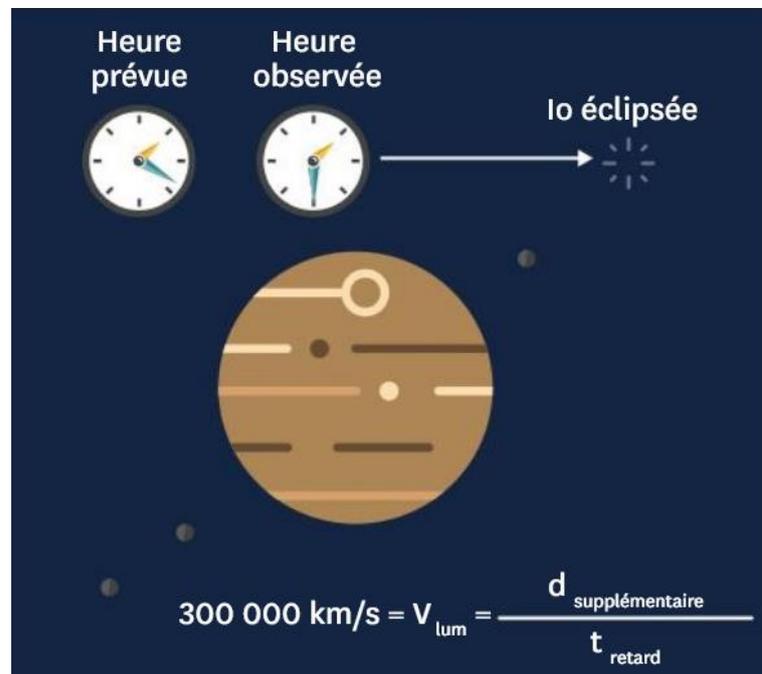
1 La lumière, une vitesse finie

- La lumière ne se propage pas de manière instantanée mais possède une vitesse mesurable.
- La vitesse précise de la lumière dans le vide est presque la même dans l'air et est de 299 792 458 m/s.
- La vitesse de la lumière n'est pas la même dans tous les milieux (par exemple elle vaut 225 000 000 m/s dans l'eau et 124 000 000 m/s dans le diamant).

L'essentiel !

La vitesse de la lumière dans le vide et dans l'air vaut environ 300 000 km/s.

C7



Heure prévue Heure observée

Io éclipsee

$$300\,000\text{ km/s} = v_{\text{lum}} = \frac{d_{\text{supplémentaire}}}{t_{\text{retard}}}$$

Bordas

Chez soi, lorsqu'on appuie sur un interrupteur, la lumière semble apparaître instantanément. On a longtemps cru que les phénomènes lumineux étaient instantanés : il y avait de la lumière ou il n'y en avait pas... C'est le savant arabe Alhazen, au x^e siècle, qui est le premier à douter de son instantanéité, mais c'est Galilée, au $xvii^e$ siècle, qui est le premier à tenter d'en mesurer la vitesse de propagation. On sait maintenant que la lumière se propage dans le vide à la vitesse de 300 000 km/s.

Hachette

1 Vitesse de la lumière



La lumière se propage à 300 000 km/s dans le vide. La lumière du Soleil met 8 min et 20 s pour nous parvenir.

La lumière semble se propager instantanément. Pourtant, elle possède une vitesse finie, de valeur très grande, qui dépend du milieu de propagation.

Dans le vide ou dans l'air, la lumière se propage à une vitesse de **300 000 km/s**.

Comme la lumière n'est pas un objet matériel, on parlera plutôt de célérité que de vitesse de la lumière.

On appelle **célérité c** de la lumière sa vitesse de propagation.

Tableau 19. Observables du critère C7 pour quatre éditions de manuels scolaires (détails).

Même si cela est plus simple car s'y prête le mieux, une application hors astronomie serait possible. Ce peut être une explication de pourquoi les élèves ont plus de difficultés à associer une vitesse bien finie, souvent voire exclusivement, pour de longues distances seulement. C'est vraisemblablement ce à quoi les manuels essaient de remédier avec d'autres activités : activité expérimentale « Comment les informations présentes sur Internet sont-elles transmises » avec la fibre optique pour Nathan en 3^e (mais concerne plus la transmission d'information en général que la lumière), activités documentaires « L'éclair et le tonnerre, à chacun sa vitesse » et « Quel signal pour la voiture autonome ? » pour Lelivrescolaire.fr en 4^e, *a priori* aucune pour Bordas, « Pourquoi voit-on un feu d'artifice avant de l'entendre ? » pour Hachette en 4^e. C'est d'ailleurs l'occasion d'aborder les ordres de grandeur entre c et c_{son} .

X) 14. Critère de progression C8.3

- Critère 8 (C8) : Progression proposée par chaque éditeur des manuels.
 - Critère 8.3 (C8.3) : Descriptif du programme, année après année dans le cycle 4.

Les tableaux qui suivent (**Tableau 20**, **Tableau 21**, **Tableau 22** et **Tableau 23**) établissent la progression de l'enseignement de la lumière, de la 5^e à 3^e, en consultant chaque manuel (Physique-

Chimie 5^e, Physique-Chimie 4^e, et Physique-Chimie 3^e) de chaque édition. Ils donnent une idée de la lisibilité et de l'application du BO dans chaque manuel.

Manuel scolaire (Physique-Chimie Cycle 4)

Nathan

Manuel de 5^e

- Chapitre 14 : Signaux lumineux et autres types de rayonnement
 1. Quels sont les différents types de rayonnement émis par le Soleil ? [AD]
 2. Dans quels milieux la lumière visible se propage-t-elle ? [AE]
 3. Comment se propage la lumière et comment représenter sa trajectoire ? [AE]
 4. La lumière se propage-t-elle instantanément ? [AD]

Manuel de 4^e

- Chapitre 14 : Signaux lumineux et autres types de rayonnement
 1. Quels sont les différents types de rayonnement émis par le Soleil ? [AD]
 2. Dans quels milieux la lumière visible se propage-t-elle ? [AE]
 3. Comment se propage la lumière et comment représenter sa trajectoire ? [AE]
 4. La lumière se propage-t-elle instantanément ? [AD]
- Chapitre 15 : Utilisation des propriétés des signaux lumineux
 1. Comment utiliser la lumière diffusée ? [DI]
 2. Pourquoi l'énergie transportée par la lumière peut-elle présenter un danger ? [AD]
 3. Quelles sont les applications des rayonnements en médecine ? [AD]
 4. Comment calculer la distance parcourue par la lumière dans l'Univers ? [AD]

Manuel de 3^e

- Chapitre 13 : Utilisation des propriétés des signaux lumineux
 1. Comment utiliser la lumière diffusée ? [DI]
 2. Pourquoi l'énergie transportée par la lumière peut-elle présenter un danger ? [AD]
 3. Quelles sont les applications des rayonnements en médecine ? [AD]
 4. Comment calculer la distance parcourue par la lumière dans l'Univers ? [AD]

C8.3

- Chapitre 14 : Transmission de l'information
 1. Comment les informations présentes sur Internet sont-elles transmises ? [AE]
- Comment transmettre des données à l'aide de signaux sonores ? [AD]

Tableau 20. Observables du critère C8.3 pour quatre éditions de manuels scolaires (pour Nathan).

Manuel scolaire (Physique-Chimie Cycle 4)	
Lelivrescolaire.fr	
C8.3	<p><u>Manuel de 5^e</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Chapitre 10 : La lumière <ol style="list-style-type: none"> 1. Le principe de la vision [AD] 2. Comment observer une éclipse de soleil (<i>sic</i>) sans risques ? [AE] 3. Comment prédire la taille d'une ombre ? [AE] 4. Attention aux lasers ! [TC]
	<p><u>Manuel de 4^e</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Chapitre 11 : Vitesse de propagation des signaux <ol style="list-style-type: none"> 1. La lumière a-t-elle une vitesse infinie ? [AD] 2. L'éclair et le tonnerre, à chacun sa vitesse [AD] 3. Quelle est la taille de la nébuleuse du Crabe ? [AD] 4. Quel signal pour la voiture autonome ? [TC]
	<p><u>Manuel de 3^e</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Chapitre 11 : Des signaux au-delà de la perception humaine <ol style="list-style-type: none"> 1. Dans quelles conditions peut-on ne plus entendre ? [AD] 2. La lumière a-t-elle des versions infra et ultra ? [AD] 3. Les signaux radio ont-ils des points communs avec les signaux lumineux ? [AD] 4. Quels types de signaux utilisons-nous au XXI^e siècle ? [TC]

Tableau 21. Observables du critère C8.3 pour quatre éditions de manuels scolaires (pour Lelivrescolaire.fr).

Manuel scolaire (Physique-Chimie Cycle 4)	
Bordas	
C8.3	<p><u>Manuel de 5^e</u></p>

- Chapitre 11 : Propagation de la lumière
 1. Sources primaires et objets diffusants [AD]
 2. La propagation de la lumière [TC]
 3. Conditions de visibilité ? [DI]
 4. Théâtre d'ombres [AE]

Manuel de 4^e

- Chapitre 11 : Vitesse de la lumière
 1. La vitesse de la lumière [AD]
 2. Mesure de distances [TC]
 3. La distance Terre-Lune [DI]
 4. L'unité « année-lumière » [AD]

Manuel de 3^e

- Chapitre 11 : Rayonnement
 1. Signaux sonores et fréquences [AD]
 2. Répulsif pour jardin [AE]
 3. Au-delà du visible [TC]
 4. Portable et rayonnement radio [DI]
- Chapitre 12 : Signal et information
 1. Des signaux pour communiquer [AD]
 2. Quelques techniques de communication [AD]
 3. Le Li-Fi [DI]
 4. La fibre optique [AE]

Tableau 22. Observables du critère C8.3 pour quatre éditions de manuels scolaires (pour Bordas).

Manuel scolaire (Physique-Chimie Cycle 4)

Hachette

Manuel de 5^e

C8.3

- Module 8 : Les signaux lumineux et les signaux sonores
 1. Peut-on observer une éclipse solaire depuis n'importe-où sur la Terre ? [DE]
 2. La nuit, tous les points lumineux dans le ciel sont-ils des étoiles ? [AD]
 3. Pourquoi les indiens plaçaient-ils une oreille sur le sol ? [AD]
 4. Comment communiquer avec des pots de yaourt ? [AE]

Manuel de 4^e

- Module 8 : Les signaux lumineux et les signaux sonores
 1. La lumière des étoiles nous parvient-elles instantanément ? [AD]
 2. Comment détecter une lumière invisible ? [AE]
 3. Pourquoi voit-on un feu d'artifice avant de l'entendre ? [AE]
 4. Comment une chanteuse peut-elle émettre des sons différents [AE]
 5. Comment un SMS est-il transmis ? [AD]

Manuel de 3^e

- Module 8 : Les signaux lumineux et les signaux sonores
 1. La mesure de la distance Terre-Lune a-t-elle toujours été précise ? [AD]
 2. La radiographie est-elle un acte médical sans danger ? [AD]
 3. L'être humain entend-il comme les animaux ? [AE]
 4. Comment une chauve-souris repère-t-elle ses proies ? [AE]
 5. Comment une information est-elle transmise depuis l'espace ? [AE]

Tableau 23. Observables du critère C8.3 pour quatre éditions de manuels scolaires (pour Hachette).

Dans le détail :

- Nathan : En 5^e, le son et la lumière sont étudiés (deux chapitres, un par signal). En 4^e, il ne reste que la lumière, et le manuel met à nouveau le chapitre sur la lumière vu en 5^e avant d'ajouter un chapitre nouveau. En 3^e, même stratégie (mettre un ancien chapitre de 4^e, ajouter un nouveau chapitre).
- Lelivrescolaire.fr : En 5^e et en 4^e, la lumière et le son (son modèle et sa vitesse) sont étudiés. En 3^e, le livre va plus loin en dépassant le domaine visible ou audible.
- Bordas : En 5^e, propagation de la lumière et du son. En 4^e, vitesse de la lumière et du son. En 3^e, ce sont principalement des applications.
- Hachette : Son et lumière sont étudiés chaque année. Pour la vitesse de la lumière, elle est étudiée en 4^e et son exploitation dans la mesure de distance l'est en 3^e. En remarque, une activité (activité « La radiographie est-elle un acte médical sans danger ? ») est présente dans le manuel de 3^e mais pas dans celui de cycle 4 (alors que les manuels de chaque année scolaire reprennent, normalement, toutes les activités du cycle).

Dans une vision plus large, il serait intéressant de consulter :

- Les exercices des manuels.
- Les cahiers de l'élève (cahiers d'activités, complémentaire aux manuels).

ANNEXES

« VI) Situation expérimentale »

X) 15. Sujets des tests et de l'évaluation

Les sujets sont ceux : du *pré*-test (Figure 37, Figure 38 et Figure 39), de l'évaluation sommative (Figure 40) et du *post*-test (Figure 41).

Physique-Chimie - D. - Collège Croix d'Argent (2021/2022)

NOM Prénom (classe) : _____ (5e _____)

Des signaux pour observer et communiquer

Diagnostic des connaissances et compétences

Signaux lumineux

Ce diagnostic n'est PAS NOTÉ.

- Écrire au stylo.
- Après avoir répondu à une question, merci de ne pas revenir en arrière (pas de correcteur liquide).

Partie 1

→ À l'aide d'une phrase ou d'un schéma (ou des deux), explique ce qu'est la lumière, pour toi.

→ Que sais-tu sur la propagation de la lumière, c'est-à-dire la manière dont se déplace la lumière ?

Partie 2

→ Le son est un signal qui se propage à une vitesse de 340 m/s. À ton avis, la lumière se propage : avec une vitesse finie. avec une vitesse infinie. je ne sais pas.

→ Les sources primaires de lumière sont des objets qui émettent leur propre lumière (exemple : le Soleil, une lampe, une flamme d'une bougie).

1

Figure 37. Pré-test, page 1.

Les objets diffusants, eux, reçoivent la lumière et la restituent (exemple : la Lune qui renvoie la lumière du Soleil sur Terre).

À ton avis, la vitesse de la lumière provenant du Soleil est-elle :

- plus grande
- plus petite
- égale
- je ne sais pas

à celle provenant de la Lune ?

À ton avis, la vitesse de la lumière provenant du Soleil est-elle :

- plus grande
- plus petite
- égale
- je ne sais pas

à celle provenant d'une lampe ?

À ton avis, la vitesse de la lumière provenant d'une lampe est-elle :

- plus grande
- plus petite
- égale
- je ne sais pas

à celle provenant d'une flamme d'une bougie ?

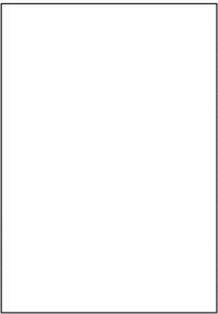
Partie 3

→ En physique, comment décrit-on le mouvement d'un objet (par exemple, celui d'un ballon) ?

→ Selon toi, comment un physicien décrit-il le mouvement de la lumière ?

Partie 4

→ À l'aide d'une phrase et/ou d'un schéma (en traçant sur l'image), explique comment la personne voit l'arbre et la flamme de la bougie.

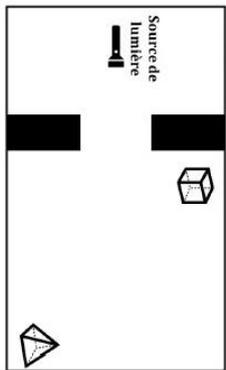
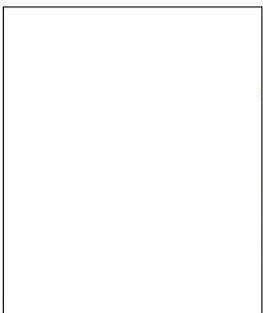


Adapté d'un manuel scolaire de cycle 4 (Le Livre Scolaire, édition de 2017).



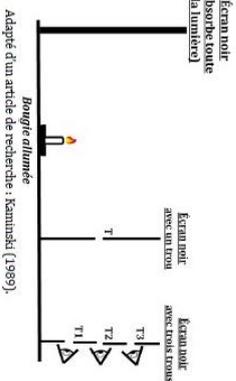
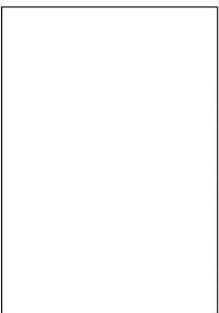
Figure 38. Pré-test, page 2.

→ À l'aide d'une phrase et/ou d'un schéma (en traçant sur l'image), explique :
 - si le cube est dans la lumière ou dans l'ombre ;
 - si la pyramide est dans la lumière ou dans l'ombre.



→ À l'aide d'une phrase et/ou d'un schéma (en traçant sur l'image) :

- Que voit-on par le trou T1 ?
- Que voit-on par le trou T2 ?
- Que voit-on par le trou T3 ?



Adapté d'un article de recherche : Kaminski (1989).

As-tu déjà étudié la lumière ? Oui Non
 Tu souviens-tu de ce que tu as appris sur la lumière l'an dernier (cycle 3) ? Oui Non
 Tu peux expliquer, si tu veux, ce que tu as vu.....

Fin du test diagnostique
 (3^e trimestre)
 1^{er} séance du thème 4 – Des signaux
 pour observer et communiquer.

Figure 39. Pré-test, page 3.

Physique-Chimie - D - Collège Croix d'Argent (2021/2022)

NOM Prénom (classe) : _____ (SP _____)

Des signaux pour observer et communiquer

Evaluation n°9		Signaux lumineux
Connaissances :	/14	Appréciation :
Compétence 1 :	/6	
Compétence 2 :	/6	
AUTO-CORR :	+ 1 □	
Note globale :	/26 ~ /20	

Don. : _____

Compétences transversales évaluées

T1 : _____

Don. : _____

Compétences évaluées

C1 : D1.3 Pratiquer le calcul numérique (exact et approché) et le calcul littéral.

C2 : D4 Modéliser et représenter des phénomènes et des objets.

5) Quelle est la situation qui explique correctement le phénomène de la vision avec le modèle du rayon lumineux ?

6) Donner la vitesse de propagation de la lumière dans le vide.
(Pour éviter tous les points, ne pas oublier l'unité.)

7) La vitesse de propagation de la lumière dépend-elle du milieu dans lequel elle se propage ?

8) En observant l'image suivante :
Les deux rayons arrivent-ils sur leur croix au même moment ?
Pourquoi ?

Oui Non

9) En modifiant l'image précédente :
Ajuster l'angle du paramètre de la vitesse de la lumière sur les deux rayons lumineux, en utilisant le modèle enrichi de la lumière.

Physique-Chimie - D - Collège Croix d'Argent (2021/2022)

EXERCICE 1 : Mesure historique de la vitesse de la lumière par Hippolyte Fizeau en 1849

En 1849, Fizeau met au point une méthode innovante pour mesurer la vitesse de propagation de la lumière dans l'air, à l'aide, notamment d'une roue dentée. Cet exercice s'intéresse à cette méthode de détermination.

Sur l'un des sites, une source de lumière est placée. Sur l'autre, un miroir. La lumière met une durée T pour atteindre l'autre site. La durée T d'un aller-retour est égale à 55 ns (nanoseconde), soit 0,000 055 s (seconde).

On rappelle la formule littérale pour calculer une vitesse v :

$$v = \frac{d}{t}$$

3) Quelle est la distance D parcourue par la lumière pendant le temps T d'un aller-retour ? Donner la formule littérale et/ou la valeur exacte.

4) Dans l'expérience de Fizeau, quelle est donc la formule littérale à utiliser pour calculer la valeur de la vitesse de la lumière ?

5) En appliquant la formule de la question précédente, calculer la vitesse de propagation de la lumière déterminée par Fizeau en 1849, en kilomètre par seconde (km/s).

6) À partir du résultat obtenu à la question précédente, donner (ou calculer) la vitesse de propagation de la lumière déterminée par Fizeau en 1849, en kilomètre par seconde (km/s).

Physique-Chimie - D - Collège Croix d'Argent (2021/2022)

Situation avec parasol blanc. Pour obtenir un éclairage uniforme, mais aussi plus naturel de la photo, le photographe utilise un parasol blanc.

Situation avec parasol blanc et flash. Le flash de l'appareil photo est maintenant activé.

Dans chacune des trois situations, tracer le(s) rayon(s) de lumière montrant le trajet de la lumière permettant de voir la pose à travers l'appareil photo.

Quelle niveau de difficulté donnez-vous à ce sujet ?

Facile Normal Difficile Si difficile, pourquoi ? _____

As-tu révisé le chapitre lié à ce sujet ? Oui Non

Aide-correction

1) Sur la copie rendre (et noter), possibilité de gagner un point bonus en corrigeant toi-même ou copie (un seul) avant de la rendre à l'enseignant (recopier la correction, par exemple).

2) Si la correction est bien rédigée et bien corrigée, soigneusement et complètement, + 2 points : le note sera alors multipliée par 2/3.

3) ATTENTION ! les parents (distribués) ont signé la copie avant.

Date de l'évaluation (à inscrire)

Signature parent(s)

Figure 40. Les signaux lumineux, évaluation à la fois par une notation chiffrée et par une notation par compétences. (Erratum : la compétence D1.3 devrait être une compétence D4.)

NOM Prénom (classe) : _____ (5^e _____)

Des signaux pour observer et communiquer

Diagnostic final des connaissances et compétences **Signaux lumineux**

Ce diagnostic n'est PAS NOTÉ.

- Écrire au stylo.
- Après avoir répondu à une question, merci de ne pas revenir en arrière (pas de correcteur liquide).

Partie 1

→ À l'aide d'une phrase ou d'un schéma (ou des deux), explique ce qu'est la lumière, pour toi.

→ Que sais-tu sur la propagation de la lumière, c'est-à-dire la manière dont se déplace la lumière ?

Partie 2

→ Le son est un signal qui se propage à une vitesse de 340 m/s.

À ton avis, la lumière se propage : avec une vitesse finie. avec une vitesse infinie. Je ne sais pas.

→ Les sources primaires de lumière sont des objets qui émettent leur propre lumière (exemple : le Soleil, une lampe, une flamme d'une bougie).

Les objets diffusants, eux, reçoivent la lumière et la restituent (exemple : la Lune qui renvoie la lumière du Soleil sur Terre).

À ton avis, la vitesse de la lumière provenant du Soleil est-elle : plus grande plus petite égale Je ne sais pas à celle provenant de la Lune ?

À ton avis, la vitesse de la lumière provenant du Soleil est-elle : plus grande plus petite égale Je ne sais pas à celle provenant d'une lampe ?

À ton avis, la vitesse de la lumière provenant d'une lampe est-elle : plus grande plus petite égale Je ne sais pas à celle provenant d'une flamme d'une bougie ?

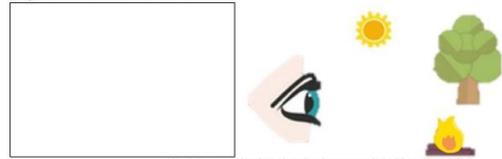
Partie 3

→ En physique, comment décrit-on le mouvement d'un objet (par exemple, celui d'un ballon) ?

→ Selon toi, comment un physicien décrit-il le mouvement de la lumière ?

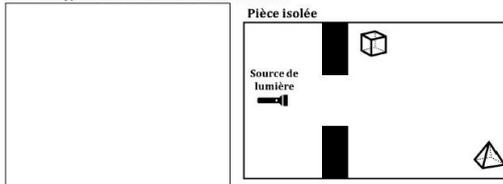
Partie 4

→ À l'aide d'une phrase et/ou d'un schéma (en traçant sur l'image), explique comment la personne voit l'arbre et la flamme du feu.

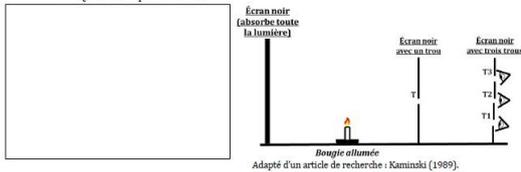


Adapté d'un manuel scolaire de cycle 4 (Le Livre Scolaire, édition de 2017).

→ À l'aide d'une phrase et/ou d'un schéma (en traçant sur l'image), explique :
 - si le cube est dans la lumière ou dans l'ombre ;
 - si la pyramide est dans la lumière ou dans l'ombre.



→ À l'aide d'une phrase et/ou d'un schéma (en traçant sur l'image) :
 - Que voit-on par le trou T1 ?
 - Que voit-on par le trou T2 ?
 - Que voit-on par le trou T3 ?



Adapté d'un article de recherche : Kaminski (1989).

Partie 5

→ Modélisation de la lumière : Représenter la lumière, SOIT avec le modèle du rayon lumineux, SOIT avec le modèle enrichi du rayon lumineux.

→ Modélisation de la lumière : Représenter la lumière dans le vide, SOIT avec le modèle du rayon lumineux, SOIT avec le modèle enrichi du rayon lumineux.

Modélisation de la lumière (application) :

Dans chaque situation, représenter la lumière, de la source primaire à l'œil, avec le modèle que tu veux (modèle « classique » ou modèle enrichi).

1 Milieu : l'air

2 Milieu : l'air

Dans cette situation 2, la lumière provenant du Soleil et la lumière provenant de la flamme arrivent-elles en même temps vers l'œil ? Oui. Non.

Pourquoi ?

3 Milieu : le vide

Dans cette situation 3, la lumière provenant du Soleil et la lumière provenant de la flamme arrivent-elles en même temps vers l'œil ? Oui. Non.

Pourquoi ?

Penses-tu avoir compris le chapitre sur la lumière ? Oui, très bien Oui, à peu près Non, pas trop Non, pas du tout

As-tu révisé le chapitre sur la lumière ? Oui Non

Fin du test diagnostique final (3^e trimestre).
 Dernière séance du thème 4 (après évaluation) – Des signaux pour observer et communiquer.

Figure 41. Post-test, pages 1, 2, 3 et 4.

X) 16. Corrections des tests et de l'évaluation

Les corrections sont celles : du *pré-test* (Figure 42 et Figure 43), de l'évaluation sommative (Figure 44) et du *post-test* (Figure 45).

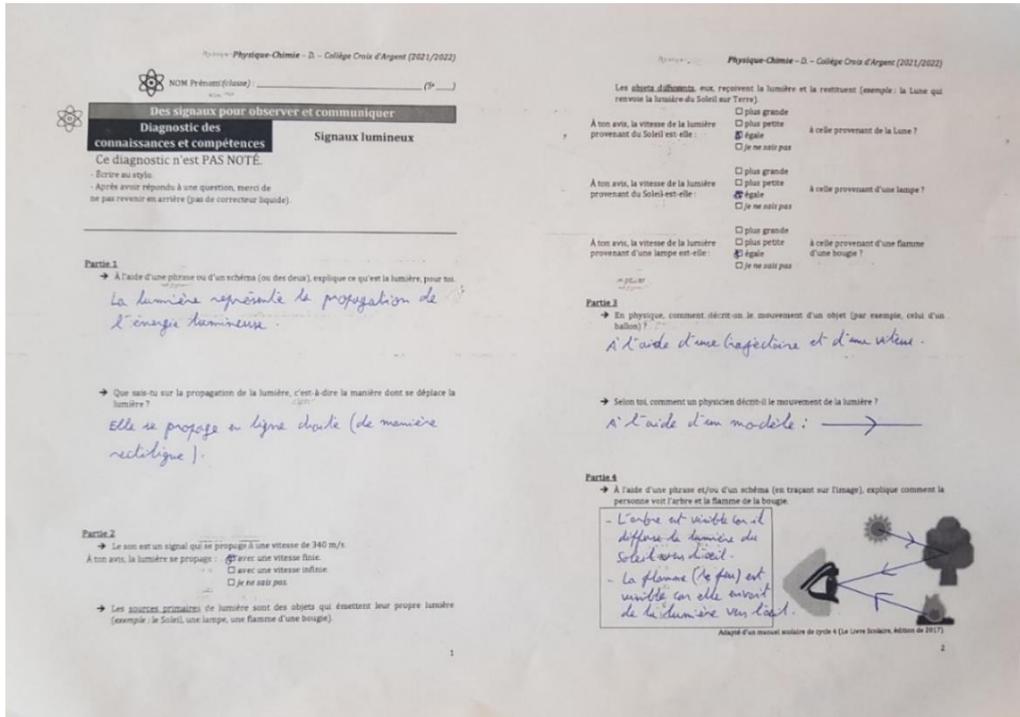


Figure 42. Correction du pré-test (face recto).

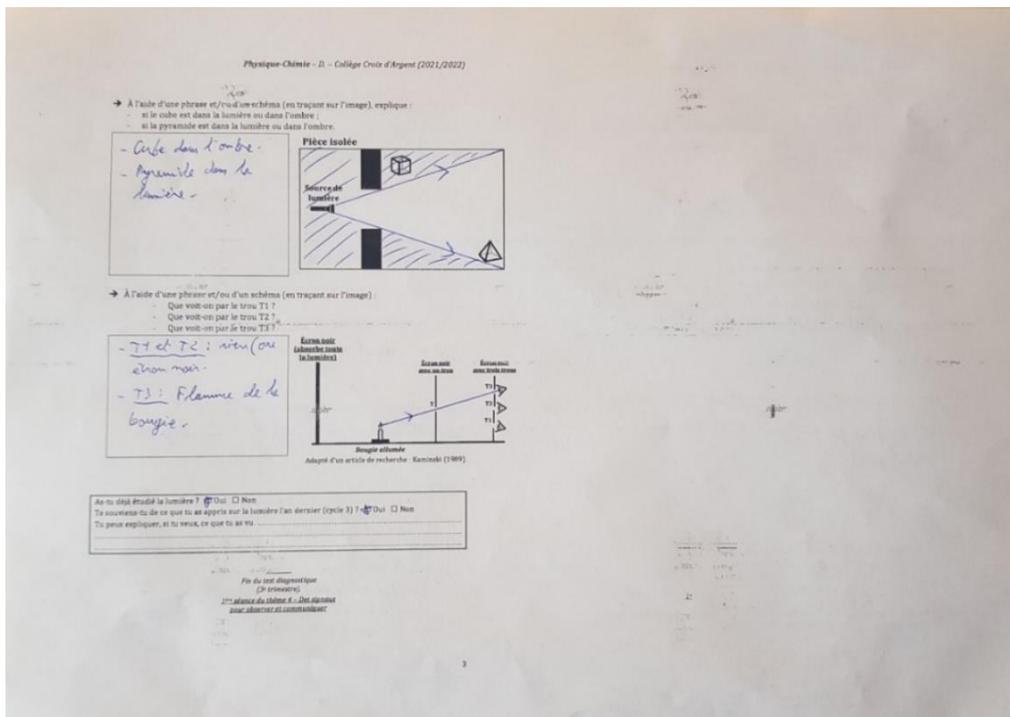


Figure 43. Correction du pré-test (face verso).

Durée : 25 minutes

Physique-Chimie - D - Collège Croix d'Argent (2021/2022)

NOM Prénom (classe) _____ (p. _____)

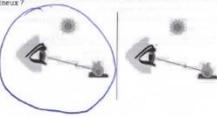
Des signaux pour observer et communiquer	
Évaluation n°9	
Compétences :	/14
Compétence 1 :	/6
Compétence 2 :	/6
AUTO CORR :	+ 1 □
Note globale :	/26 ~ /20

Compétences transversales évaluées	
Dom. 1	Restitution de connaissances.
Dom. 2	Compétences évaluées
DI.3	Pratiquer le calcul numérique (exact et approché) et le calcul littéral.
D4	Modéliser et représenter des phénomènes et des objets.

T	C
T1	

Exercice introductif : Restitution de connaissances du cours

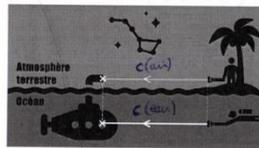
- 1) Définir une source primaire de lumière. Donner un exemple.
Objet (lumineux) qui produit de la lumière. Exemple : le Soleil.
- 2) Définir un objet diffusant. Donner un exemple.
Objet qui renvoie de la lumière (et non source primaire) dans toutes les directions. Exemple : la lune.
- 3) Dessiner le modèle du rayon lumineux.
- 4) Quelle est la situation qui explique correctement le phénomène de la vision avec le modèle du rayon lumineux ?



1

Physique-Chimie - D - Collège Croix d'Argent (2021/2022)

- 5) Quelle est la situation qui explique correctement le phénomène de la vision avec le modèle du rayon lumineux ?
- 6) Donner la vitesse de propagation de la lumière dans le vide.
 $c = 300\ 000\ 000\ m/s$
- 7) La vitesse de propagation de la lumière dépend-elle du milieu dans lequel elle se propage ?
Oui, la vitesse de propagation de la lumière dépend du milieu.
- 8) En observant l'image au vauve :
Les deux rayons arrivent-ils sur leur écran au même moment ?
*Projeteur : les deux rayons arrivent au même moment car ils se propagent dans le même milieu.
Lunette : les deux rayons arrivent au même moment car ils se propagent dans le même milieu.*



- 9) En modifiant l'image rétrécie :
Ajouter/intégrer le paramètre de la vitesse de la lumière sur les deux rayons lumineux, en utilisant le modèle enrichi de la lumière.
voir l'image.

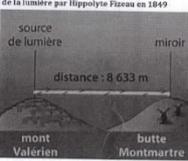
2

Physique-Chimie - D - Collège Croix d'Argent (2021/2022)

EXERCICE 1 : Mesure historique de la vitesse de la lumière par Hippolyte Fizeau en 1849

En 1849, Fizeau met au point une méthode innovante pour mesurer la vitesse de propagation de la lumière dans l'air, à l'aide, notamment d'une roue dentée. Cet exercice s'intéresse à cette méthode de détermination.

Pour effectuer son calcul, Fizeau choisit deux sites différents, en hauteur. Ces sites sont le mont Valerien et la butte Montmartre, séparés d'une distance $d = 8\ 633\ m$. Sur l'un des sites, une source de lumière est placée. Sur l'autre, un miroir. La lumière met une durée t pour atteindre l'autre site. La durée T d'un aller-retour est égale à $2t$ (microseconde), soit $0,000\ 055\ s$ (exemple).



On rappelle la formule littérale pour calculer une vitesse v :

$$v = d/t$$

- 1) Quelle est la distance D parcourue par la lumière pendant le temps T d'un aller-retour ? Donner la formule littérale et/ou la valeur numérique.
 $D = 2 \times d = 2 \times 8\ 633\ m = 17\ 266\ m = 17,266\ km$
- 2) Dans l'expérience de Fizeau, quelle est dans la formule littérale à utiliser pour calculer la valeur de la vitesse de la lumière ?
 $c = D/T$
- 3) En appliquant la formule de la question précédente, calculer la vitesse de propagation de la lumière déterminée par Fizeau en 1849 en mètre par seconde (m/s).
 $c = \frac{17\ 266\ m}{0,000\ 055\ s} = 313\ 927\ 272\ m/s$ (vitesse de la lumière de 300 000 000 m/s)
- 4) À partir du résultat obtenu à la question précédente, donner (ou calculer) la vitesse de propagation de la lumière déterminée par Fizeau en 1849 en kilomètre par seconde (km/s).
 $c \approx 313\ 927\ km/s$ (ou $313\ 927,272\ km/s$)

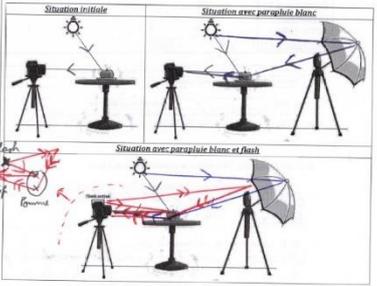
EXERCICE 2 : Chez le photographe : prise de photo dans différentes conditions

Situation initiale : Avec son appareil photo, le photographe cherche à prendre la meilleure photo d'une pomme posée sur une table.

Physique-Chimie - D - Collège Croix d'Argent (2021/2022)

Situation avec parapluie blanc : Pour obtenir un éclairage uniforme, mais aussi plus naturel de la photo, le photographe utilise un parapluie blanc.
Situation avec parapluie blanc et flash : Le flash de l'appareil photo est maintenant activé.

Dans chacune des trois situations, tracer le(s) rayon(s) de lumière montrant le trajet de la lumière permettant de voir la pomme à travers l'appareil photo.



Quel niveau de difficulté donnez-vous à ce sujet ?

Facile	Normal	Difficile	Si difficile, pourquoi ?
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

As-tu révisé le chapitre lié à ce sujet ? Oui Non

Auto-correction

Une fois la copie rendue (et notée), possibilité de jeter un coup d'œil en corrigeant soi-même sa copie (au stylo vert) avant de la rendre à l'enseignant (recto et verso, par exemple).

→ Si la correction est bien rédigée et bien corrigée, s'agréablement et complaisamment, l'élève sera alors notifié aux épreuves.

→ ATTENTION : les parents/détenteurs ont le droit de signer la copie dupliée.

Fin de l'évaluation (5 minutes) Signature parent(s)

4

Figure 44. Correction-professeur sur les signaux lumineux.

Physique-Chimie - D. - Collège Croix d'Argent (2021/2022)

Physique-Chimie - D. - Collège Croix d'Argent (2021/2022)

À l'aide d'une phrase et/ou d'un schéma (en traçant sur l'image), explique :

- si le cube est dans la lumière ou dans l'ombre ;
- si la pyramide est dans la lumière ou dans l'ombre.

Pièce isolée

Source de lumière

À l'aide d'une phrase et/ou d'un schéma (en traçant sur l'image) :

- Que voit-on par le trou T1 ?
- Que voit-on par le trou T2 ?
- Que voit-on par le trou T3 ?

Bougie allumée

Adapté d'un article de recherche : Kaminski (1989)

Modélisation de la lumière (application) :

Dans chaque situation, représenter la lumière, de la source primaire à l'œil, avec le modèle que tu veux (modèle « classique » ou modèle enrichi).

Situation 1 : Soleil, Milieu : Air, $v(\text{air})$, Oeil. *Modèle de la lumière enrichi.*

Situation 2 : Soleil, Milieu : Air, $v(\text{air})$, Oeil; Flamme d'une bougie, Milieu : Air, $v(\text{air})$, Oeil. *Dans cette situation 2, la lumière provenant du Soleil et la lumière provenant de la flamme arrivent-elles en même temps vers l'œil ? Oui Non. Pourquoi? Les rayons se propagent dans le même milieu (l'air), ils ont donc la même vitesse.*

Situation 3 : Soleil, Milieu : Vide, c , Oeil; Flamme d'une bougie, Milieu : Air, $v(\text{air})$, Oeil. *Dans cette situation 3, la lumière provenant du Soleil et la lumière provenant de la flamme arrivent-elles en même temps vers l'œil ? Oui Non. Pourquoi? Les rayons se propagent pas dans le même milieu (vide, air), ils n'ont donc pas la même vitesse.*

Partie 5

Modélisation de la lumière : Représenter la lumière, SOIT avec le modèle du rayon lumineux, SOIT avec le modèle enrichi du rayon lumineux. *Modèle de la lumière ou Modèle enrichi de la lumière*

Modélisation de la lumière : Représenter la lumière dans le vide, SOIT avec le modèle du rayon lumineux, SOIT avec le modèle enrichi du rayon lumineux. *Vide, air, ...*

Modèle de la lumière ou Modèle enrichi de la lumière

Penses-tu avoir compris le chapitre sur la lumière ? Oui, très bien Oui, à peu près Non, pas trop Non, pas du tout

As-tu révisé le chapitre sur la lumière ? Oui Non

Fin du test diagnostique final (3^e trimestre). Dernière séance du thème 4 (après l'évaluation) - Des signaux pour observer et communiquer.

Figure 45. Correction proposée pour le post-test, partie 5 (face verso).

X) 17. Comment est calculé le pourcentage de deux classes ?

Un exemple simple pour comprendre comment est calculé le pourcentage de deux classes à travers deux situations. Soit une question X et deux réponses Y1 et Y2 possibles pour X. Soit une classe de 10 élèves (classe 1), une autre classe de 10 élèves (classe 2), une autre classe de 15 élèves (classe 2'). Chaque élève répond forcément, soit Y1, soit Y2.

Situation 1 (technique de calcul statistique sans influence), **Tableau 24** :

Question X	Classe 1	Classe 2	Classe 1 et 2 (moyenne des %)	Classe 1 et 2 (% sur tous les élèves)
Réponse Y1	7	6	$= 7 + 6 = 13$	$= 7 + 6 = 13$
Réponse Y2	3	4	$= 3 + 4 = 7$	$= 3 + 4 = 7$
SOMME (-)	10	10	$= 10 + 10 = 20$	$= 10 + 10 = 20$
Pourcentage Y1 (%)	70	60	$= (70 + 60) / 2 = 65$	$= (13/20) * 100 = 65$

Pourcentage Y2 (%)	30	40	$= (30 + 40) / 2 = 35$	$= (7/20) * 100 = 35$
SOMME (%)	100	100	$= 65 + 35 = 100$	$= 65 + 35 = 100$
Commentaire			Résultats égaux (% Y1 et % Y2 identiques sur les deux dernières colonnes), pas d'influence.	

Tableau 24. Statistiques pour le calcul de moyennes dans l'étude de deux classes (situation 1).

Situation 2 (technique de calcul statistique avec influence), **Tableau 25** :

Question X	Classe 1	Classe 2'	Classe 1 et 2' (moyenne des %)	Classe 1 et 2' (% sur tous les élèves)
Réponse Y1	7	6	$= 7 + 6 = 13$	$= 7 + 6 = 13$
Réponse Y2	3	9	$= 3 + 9 = 12$	$= 3 + 9 = 12$
SOMME (-)	10	15	$= 10 + 15 = 25$	$= 10 + 15 = 25$
Pourcentage Y1 (%)	70	40	$= (70 + 40) / 2 = 55$	$= (13/25) * 100 = 52$
Pourcentage Y2 (%)	30	60	$= (30 + 60) / 2 = 45$	$= (12/20) * 100 = 48$
SOMME (%)	100	100	$= 55 + 45 = 100$	$= 52 + 48 = 100$
Commentaire			Résultats différents (% Y1 et % Y2 pas identiques sur les deux dernières colonnes), influence.	

Tableau 25. Statistiques pour le calcul de moyennes dans l'étude de deux classes (situation 2).

La méthode de calcul utilisée est la suivante : % sur tous les élèves (moins sensible aux valeurs de bords). Les valeurs sont arrondies à un chiffre après la virgule.

X) 18. Résultats visuels sur la modélisation de la lumière avec le modèle du rayon lumineux ou avec le modèle enrichi (sans et avec la précision du milieu), parmi les élèves ayant répondu

Les résultats de la partie 5 sont affichés et développés (**Figure 46** et **Figure 47**). Il est tenu compte, seulement, du nombre d'élèves ayant répondu (pourcentages recalculés).

Question

Modélisation de la lumière : Représenter la lumière, SOIT avec le modèle du rayon lumineux, SOIT avec le modèle enrichi du rayon lumineux.

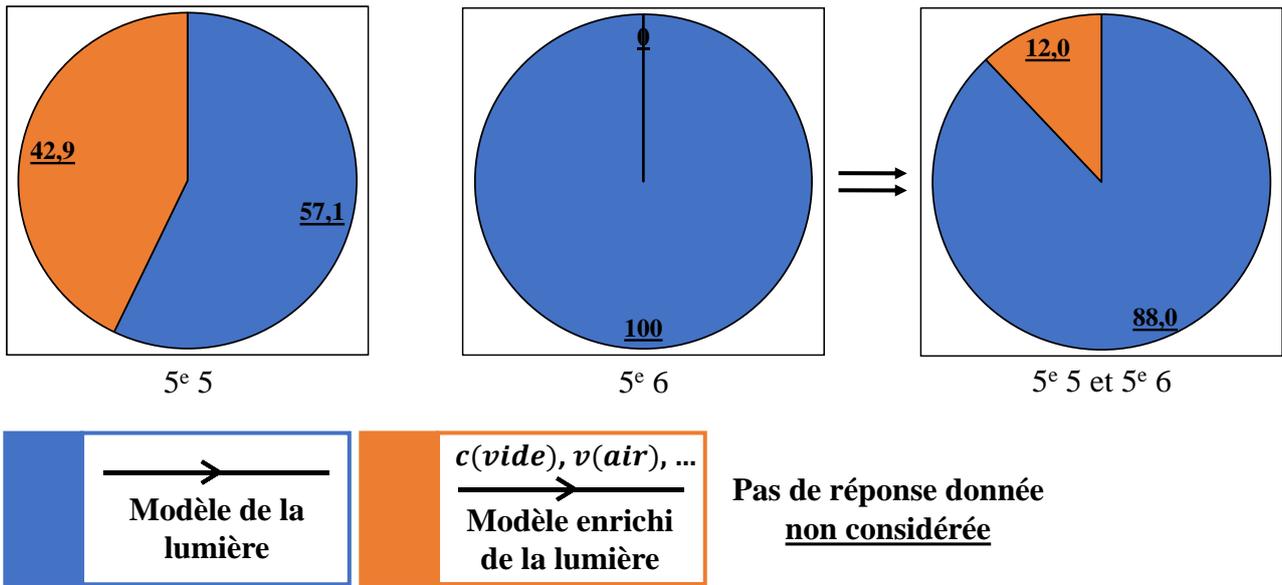


Figure 46. Statistiques post-test (partie 5) du choix du modèle de la lumière sans préciser le milieu de propagation dans la question. C'est le pourcentage d'élèves ayant répondu qui est pris en compte (33,3 % en 5^e 5, 81,8 % en 5^e 6, 58,1 % en 5^e 5 et 5^e 6).

Question

Modélisation de la lumière : Représenter la lumière dans le vide, SOIT avec le modèle du rayon lumineux, SOIT avec le modèle enrichi du rayon lumineux.

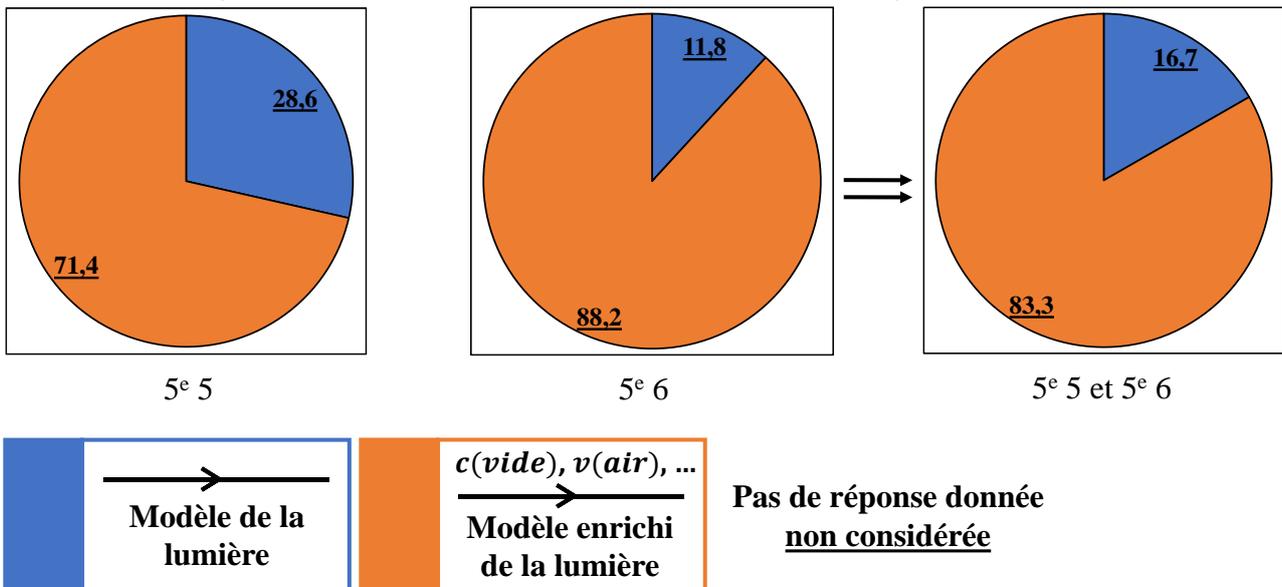


Figure 47. Statistiques post-test (partie 5) du choix du modèle de la lumière sans préciser le milieu de propagation dans la question. C'est le pourcentage d'élèves ayant répondu qui est pris en compte (42,9 % en 5^e 5, 77,3 % en 5^e 6, 60,5 % en 5^e 5 et 5^e 6).

X) 19. Séquence « CHAPITRE 2 : Les signaux lumineux »

X) 19. i. Support de la séquence

Figure 48 : l'ensemble des diapositives de la séquence de la lumière (cours, activités (activités documentaires), exercices et exercices corrigés, récapitulatif) est apposé.

THÈME

Des signaux pour observer et communiquer

CHAPITRE 2

Signaux lumineux

- Physique-Chimie (5^e) -
2021/2022

Enseignant : M. Y Duplan



	<h3>DIAGNOSTIQUE</h3> <p>Quel est votre niveau sur les signaux ?</p>	
---	--	---

RETOURS pré-test

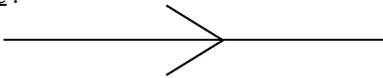
I) Modélisation de la lumière

Définition d'une « modélisation » : Ici, représentation (souvent simplifiée) d'un phénomène.

Modèle de la lumière : La lumière est modélisée par un
 (ou).

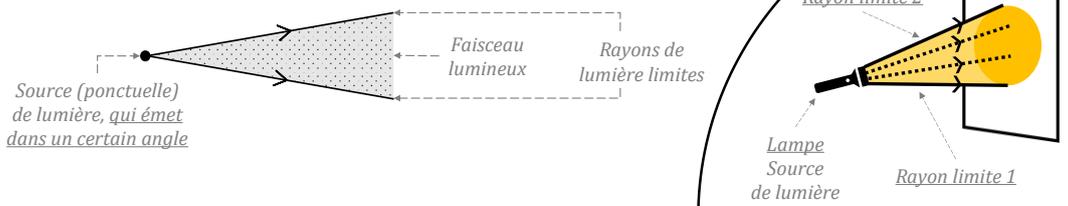
Le trajet de la lumière est représenté par une droite fléchée :

Cette modélisation est vraie dans un milieu isotrope (propriétés identiques dans toutes les directions), homogène (propriétés identiques en tout point) et transparent (qui laisse passer la lumière).



Faisceau de lumière :

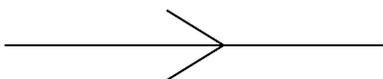
.....
 provenant d'une seule et même source.



Définition d'une « modélisation » : Ici, représentation (souvent simplifiée) d'un phénomène.

Modèle de la lumière : La lumière est modélisée par un **rayon lumineux** (ou **rayon de lumière**).
 Le trajet de la lumière est représenté par une droite fléchée :

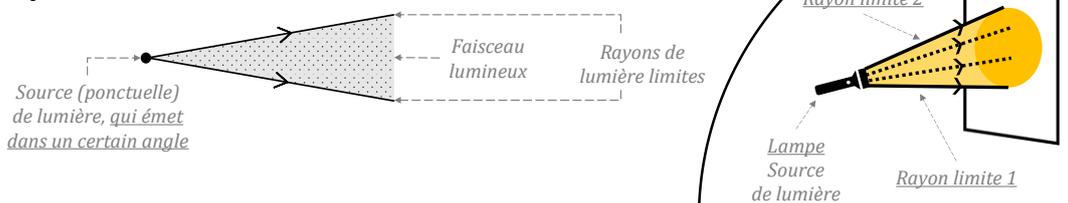
Cette modélisation est vraie dans un milieu isotrope (propriétés identiques dans toutes les directions), homogène (propriétés identiques en tout point) et transparent (qui laisse passer la lumière).



Faisceau de lumière :

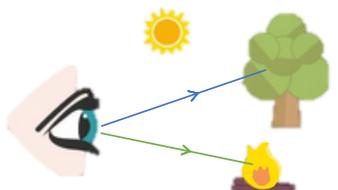
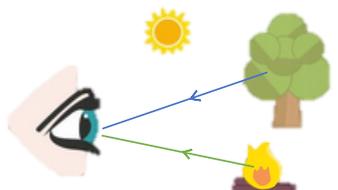
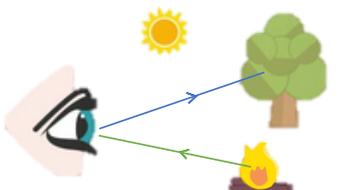
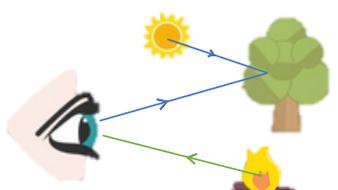
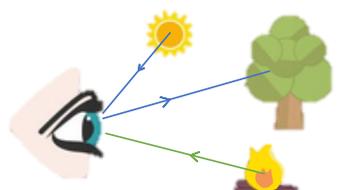
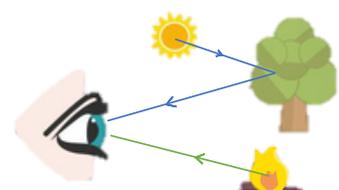
Ensemble de rayons lumineux

provenant d'une seule et même source.



II) Principe de la vision : source primaire, objet diffusant, et rôle de l'œil

ÉNONCÉ : Comment l'œil de la personne est capable de voir l'arbre et le feu ? Entourer la bonne situation.

		
<p>① L'œil est actif, il envoie des rayons lumineux pour voir.</p>	<p>② L'œil est passif, il reçoit des rayons lumineux pour voir.</p>	<p>③ L'œil est actif et passif, il envoie et reçoit des rayons lumineux pour voir.</p>
		
<p>④ L'œil est actif et passif ; le Soleil (vers l'arbre) joue un rôle dans la vision.</p>	<p>⑤ L'œil est actif et passif ; le Soleil (vers l'œil) joue un rôle dans la vision.</p>	<p>⑥ L'œil est passif ; le Soleil (vers l'arbre) joue un rôle dans la vision.</p>

DOCUMENTS SCIENTIFIQUES D'AIDES :

Document 1 Deux théories concurrentes

Selon la **théorie de l'intromission**, la vision est due à l'entrée de quelque chose dans l'œil.

La **théorie de l'émission** affirme, elle, que l'œil émet des rayons visuels.

La **théorie de l'intromission** sera validée au XVIIe, grâce à l'observation d'une image se formant sur la rétine d'un œil de bœuf.

Document 2 Étoiles et planètes, quelles différences ?

Document 2 Étoiles et planètes, quelles différences ?

Les étoiles sont des « **sources primaires** » : elles produisent la lumière qu'elles nous envoient.

Les planètes et leurs lunes sont en revanche des **objets diffusants** : elles renvoient une lumière préalablement reçue. Sur Terre, tout objet est diffusant, sauf s'il est parfaitement noir ou s'il permet d'éclairer.

ÉNONCÉ : Comment l'œil de la personne est capable de voir l'arbre et le feu ? Entourer la bonne situation.

① L'œil est actif, il envoie des rayons lumineux pour voir.

② L'œil est passif, il reçoit des rayons lumineux pour voir.

③ L'œil est actif et passif, il envoie et reçoit des rayons lumineux pour voir.

④ L'œil est actif et passif ; le Soleil (vers l'arbre) joue un rôle dans la vision.

⑤ L'œil est actif et passif ; le Soleil (vers l'œil) joue un rôle dans la vision.

⑥ L'œil est passif ; le Soleil (vers l'arbre) joue un rôle dans la vision.

À retenir
Un objet n'est visible que si l'œil la lumière provenant de celui-ci.
→ L'œil est donc un capteur de lumière.

• (ou) : produit la lumière qu'elle envoie/émet dans toutes les directions.

• : renvoie la lumière qu'elle diffuse (renvoie dans toutes les directions).

ATTENTION à deux cas particuliers :

- **Cas de la Lune** ☾
La Lune brille la nuit mais ce n'est pas une étoile (c'est un satellite naturel). Elle réfléchit seulement la lumière du Soleil :
- **Cas des yeux du chat** 🐱
Les yeux du chat brillent dans le noir. Pourquoi ? En réalité, ce n'est pas vrai : dans le noir total, les yeux du chat ne brillent plus. Le chat possède, en fait, des cellules supplémentaires qui renvoie beaucoup de lumière, un œil de chat est donc :

À retenir
Un objet n'est visible que si l'œil **reçoit** la lumière provenant de celui-ci.
→ L'œil est donc un capteur de lumière.

• **Source primaire** (ou **objet lumineux**) : produit la lumière qu'elle envoie/émet dans toutes les directions.

• **Objet diffusant** : renvoie la lumière qu'elle diffuse (renvoie dans toutes les directions).

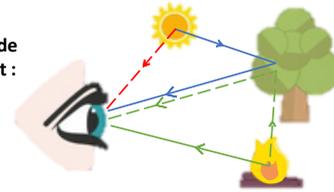
ATTENTION à deux cas particuliers :

- **Cas de la Lune** ☾
La Lune brille la nuit mais ce n'est pas une étoile (c'est un satellite naturel). Elle réfléchit seulement la lumière du Soleil : **objet diffusant**.
- **Cas des yeux du chat** 🐱
Les yeux du chat brillent dans le noir. Pourquoi ? En réalité, ce n'est pas vrai : dans le noir total, les yeux du chat ne brillent plus. Le chat possède, en fait, des cellules supplémentaires qui renvoie beaucoup de lumière, un œil de chat est donc : **objet diffusant**.



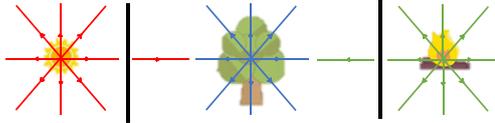
ATTENTION

En réalité, un schéma plus réel (représentant plus de phénomènes et de rayons lumineux), pourrait être le suivant :

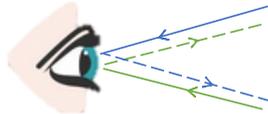


D'autres rayons pourraient être construits :

- Tous les rayons émis dans tous les angles.



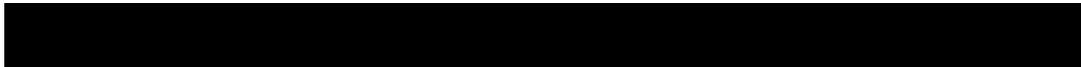
- Tous les rayons qui « rebondissent » sur l'œil par exemple.



Pourquoi ne pas construire ces rayons ? Pour ne pas complexifier le schéma.

III) Travailler sur les ombres

ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE Couleur et ombres



IV) Célérité de la lumière

Activité documentaire Est-ce que la vitesse de la lumière est infinie ?

Valeur de la vitesse $v_{lumière}$ (ou célérité c) de la lumière dans le VIDE

Au XVII^e siècle, l'astronome James Bradley donnera, pour la première fois, une **valeur précise de la vitesse de la lumière** en se basant sur la distance Terre-Soleil.

→ Cette valeur est la suivante :

300.000 km/s. ←

Depuis, plusieurs scientifiques ont contribué à **améliorer la précision de la valeur de la vitesse de la lumière**, que ce soit par l'expérience ou via la physique plus théorique (équations de Maxwell, XIX^e siècle).

→ Aujourd'hui, la valeur exacte de la vitesse de la lumière est la suivante :

299.792 km/s. ←

D'où : $c = v_{lumière} \text{ dans le vide} = 300.000 \text{ km/s} = 300.000.000 \text{ m/s}$.

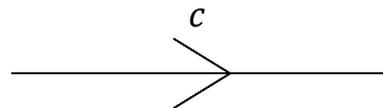
V) Célérité de la lumière en fonction du milieu de propagation

Activité documentaire Quelle est la vitesse de la lumière dans un milieu différent du vide ?

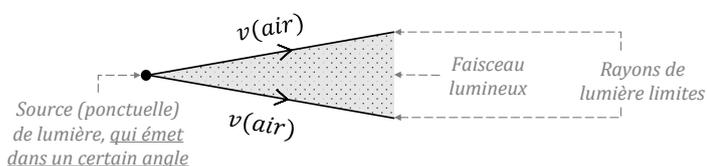
Modèle ENRICHI de la lumière : La lumière est modélisée par un **rayon lumineux** (ou **rayon de lumière**) auprès duquel la vitesse est représentée.

Le trajet de la lumière est représenté par une droite fléchée et faisant apparaître la grandeur vitesse. *Exemple dans le vide :*

Cette modélisation est vraie dans un milieu isotrope (propriétés identiques dans toutes les directions), homogène (propriétés identiques en tout point) et transparent (qui laisse passer la lumière).



Faisceau de lumière (exemple dans l'air) :



La modélisation de la lumière avec intégration de la vitesse (modèle enrichi) n'est pas un standard !

Dès que le concept de vitesse de la lumière est bien compris, il faut s'habituer à utiliser la modélisation de la lumière sans intégration de la vitesse (par simplification).

VI) Mesure de distance en exploitant la célérité de la lumière

INTRODUCTION : Le 23/02/87, les astronomes ont détecté l'explosion d'une étoile dans le nuage de Magellan (un groupe de galaxies).

QUESTION : À quelle distance, en kilomètre (km), se trouve cette étoile ?

ÉNONCÉ :

1. Lors de sa propagation depuis le nuage de Magellan jusqu'à la Terre, quels milieux la lumière aura traversé ? Quelle est donc la vitesse de la lumière à considérer ?

2. Sachant que $1 \text{ an} = 365 \times 24 \times 60 \times 60 = 31\,536\,000 \text{ s}$, calculer la distance à laquelle a eu lieu l'explosion ?



Photographie (à gauche, à droite avec zoom) de l'explosion d'une étoile, située à une distance pour laquelle la lumière a mis 170 000 ans avant d'arriver sur Terre.

Document 1 Vitesse de la lumière dans différents milieux

Différentes vitesses sont données dans le tableau :

Milieu transparent	Vide	Air	Eau	Verre	Diamant
Vitesse de la lumière (km/s)	300 000 exactement	300 000 environ	225 000	200 000	124 000

Document 2 Calculer la distance parcourue par la lumière

Pour calculer une vitesse (v) de la lumière en fonction de la distance parcourue (d) et de la durée de parcours (t), on utilise la formule littérale :

$$v = d/t$$

Pour calculer une distance (d), on utilise la méthode du triangle :

$$d = v \times t$$

(avec : d en kilomètre (km), v en kilomètre/seconde (km/s) et t en seconde (s).)



INTRODUCTION : Le 23/02/87, les astronomes ont détecté l'explosion d'une étoile dans le nuage de Magellan (un groupe de galaxies).

QUESTION : À quelle distance, en kilomètre (km), se trouve cette étoile ?

ÉNONCÉ :

1. Lors de sa propagation depuis le nuage de Magellan jusqu'à la Terre, quels milieux la lumière aura traversé ? Quelle est donc la vitesse de la lumière à considérer ?

La lumière a traversé le vide puis l'air. Sa vitesse est donc environ 300 000 km/s (d'après le doc. 2).

2. Sachant que $1 \text{ an} = 365 \times 24 \times 60 \times 60 = 31\,536\,000 \text{ s}$, calculer la distance à laquelle a eu lieu l'explosion ?

$$\begin{aligned}
 d &= c \times t \text{ (formule doc. 2, on néglige l'épaisseur de l'atmosphère de la Terre)} \\
 &= 300\,000 \text{ km/s} \times (170\,000 \times 31\,536\,000 \text{ s}) \\
 &\approx 1,60\,834\text{E}+18 \text{ km (affichage calculatrice)} \\
 &\approx 1,60\,834 \cdot 10^{18} \text{ km (puissances de 10 en 4e !)}
 \end{aligned}$$

L'étoile est située à presque 1,61 milliard de milliards de kilomètres (1,61 avec 18 chiffres après la virgule).



Photographie (à gauche, à droite avec zoom) de l'explosion d'une étoile, située à une distance pour laquelle la lumière a mis 170 000 ans avant d'arriver sur Terre.

Document 1 Vitesse de la lumière dans différents milieux

Différentes vitesses sont données dans le tableau :

Milieu transparent	Vide	Air	Eau	Verre	Diamant
Vitesse de la lumière (km/s)	300 000 exactement	300 000 environ	225 000	200 000	124 000

Document 2 Calculer la distance parcourue par la lumière

Pour calculer une vitesse (v) de la lumière en fonction de la distance parcourue (d) et de la durée de parcours (t), on utilise la formule littérale :

$$v = d/t$$

Pour calculer une distance (d), on utilise la méthode du triangle :

$$d = v \times t$$

(avec : d en kilomètre (km), v en kilomètre/seconde (km/s) et t en seconde (s).)



VII) LUMIÈRE – Exercice

Exercice 1 : Modèle du rayon lumineux et la lumière laser

Partie 1 : Vision du sabre laser de Star Wars



Dans *Star Wars, épisode III : La Revanche des Sith* (2005), un combat aux sabres laser (*lightsaber* en anglais, littéralement : « sabres de lumière ») s'engage.

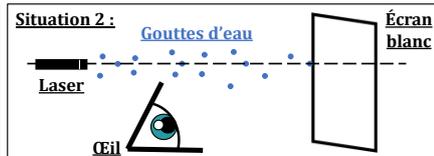
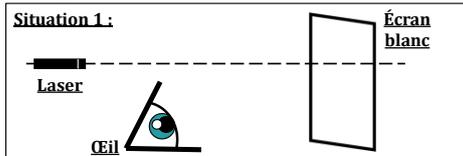
1. Quelle est la condition nécessaire pour voir un objet ?

2. Comment la lumière est-elle représentée ? Dessiner le modèle et le modèle enrichi.

Situation 1 : Lorsqu'un faisceau laser est dirigé vers un mur, seulement un point est visible.

Situation 2 : Lorsque de petites particules souspoudrent le trajet de la lumière (poussière de craie, vapeur d'eau), le trajet de la lumière se matérialise.

3. Proposer un schéma permettant de modéliser les situations 1 et 2.



4. OUI ou NON : la scène dans ce film est-elle réaliste ?

Exercice 1 : Modèle du rayon lumineux et la lumière laser

Partie 2 : Les dangers du laser



La boîte du laser comporte le pictogramme de danger suivant

. La notice est :

Pointeur laser rouge de puissance 100 mW

- Ne jamais diriger le faisceau du laser vers un appareil volant.
- Ne jamais diriger le faisceau du laser vers une personne ou un animal, en particulier vers les yeux.
- Prendre en compte les effets optiques et réfléchissants des surfaces pointées.
- Ne pas porter de bijoux ou de matière réfléchissante.

1. D'après le document des classes de laser, quelle est la classe du pointeur laser dans cette situation ? Est-il risqué de l'utiliser ?

	Puissance	Découpe industrielle et chirurgicale	Déclenche des incendies	Détruit l'œil en réception directe ou après réflexion
Classe 4	500 mW			
Classe 3b	5 mW	Recherche, défense militaire	Peut brûler la peau	Détruit l'œil en réception directe ou après réflexion
Classe 3a	1 mW	Alignements industriels	Blesse l'œil en réception directe	
Classe 2	0,039 mW	Lecture des codes-barres	Éblouit fortement	
Classe 1		Lecture DVD	Sans danger	

2. Il ne faut pas s'amuser à diriger le pointeur laser vers un objet réfléchissant, comme une montre par exemple. Compléter le schéma pour comprendre pourquoi.

Une aide sur la réflexion est à disposition.

Aide : EXPLOITATION DE LA PROPAGATION RECTILIGNE DE LA LUMIÈRE
→ La réflexion

Ce que je sais déjà : La diffusion

Ce que j'apprends : La réflexion

Exercice 1 : Modèle du rayon lumineux et la lumière laser

Partie 1 : Vision du sabre laser de Star Wars



Dans *Star Wars, épisode III : La Revanche des Sith* (2005), un combat aux sabres laser (*lightsaber* en anglais, littéralement : « sabres de lumière ») s'engage.

1. Quelle est la condition nécessaire pour voir un objet ?

Pour voir un objet, il faut que la lumière issue de cet objet arrive dans l'œil.

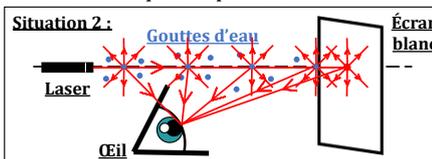
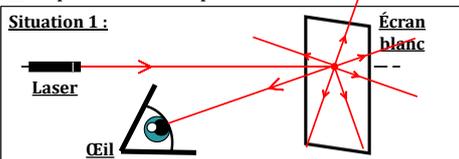
2. Comment la lumière est-elle représentée ? Dessiner le modèle et le modèle enrichi.



Situation 1 : Lorsqu'un faisceau laser est dirigé vers un mur, seulement un point est visible.

Situation 2 : Lorsque de petites particules souspoudrent le trajet de la lumière (poussière de craie, vapeur d'eau), le trajet de la lumière se matérialise.

3. Proposer un schéma permettant de modéliser les situations 1 et 2 afin que l'œil puisse voir.



4. OUI ou NON : la scène dans ce film est-elle réaliste ?

Non. VOIR expérience professeur.

Exercice 1 : Modèle du rayon lumineux et la lumière laser

Partie 2 : Les dangers du laser



La boîte du laser comporte le pictogramme de danger suivant

La notice est :

Pointeur laser rouge de puissance 100 mW

- Ne jamais diriger le faisceau du laser vers un appareil volant.
- Ne jamais diriger le faisceau du laser vers une personne ou un animal, en particulier vers les yeux.
- Prendre en compte les effets optiques et réfléchissants des surfaces pointées.
- Ne pas porter de bijoux ou de matière réfléchissante.

1. D'après le document des classes de laser, quelle est la classe du pointeur laser dans cette situation ? Est-il risqué de l'utiliser ?

La notice indique une puissance de 100 mW, ce qui correspond, d'après le doc., à un laser de classe 3b.
Pouvant brûler la peau et détruire l'œil (en réflexion directe ou indirecte), son utilisation comporte donc des risques.

	Puissance	Dangers
Classe 4	500 mW	<ul style="list-style-type: none"> > Déclenche des incendies > Brûle gravement la peau > Détruit l'œil en réception directe ou après réflexion > Blesse l'œil après diffusion
Classe 3b	5 mW	<ul style="list-style-type: none"> > Peut brûler la peau > Détruit l'œil en réception directe ou après réflexion
Classe 3a	1 mW	<ul style="list-style-type: none"> > Blesse l'œil en réception directe
Classe 2	0,039 mW	<ul style="list-style-type: none"> > Éblouit fortement
Classe 1		<ul style="list-style-type: none"> > Sans danger

2. Il ne faut pas s'amuser à diriger le pointeur laser vers un objet réfléchissant, comme une montre par exemple. Compléter le schéma pour comprendre pourquoi.

Une aide sur la réflexion est à disposition.

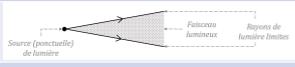
Aide : EXPLOITATION DE LA PROPAGATION RECTILIGNE DE LA LUMIÈRE
→ La réflexion

Ce que je sais déjà :	Ce que j'apprends :
La diffusion	La réflexion

RÉCAPITULATIF

Ce qu'il faut retenir
CHAPITRE 2 - Les signaux lumineux

Questions	
1)	Donner le modèle du rayon lumineux.
2)	Dessiner et légènder un faisceau lumineux.
3)	Principe de la vision.
4)	Source primaire et objet diffusant.
5)	À quoi correspond une ombre ? Comment varie la taille d'une ombre en fonction de la distance ?
6.1)	Est-ce que la vitesse de la lumière est infinie ? Quelle est la vitesse de propagation de la lumière <u>dans le vide</u> ?
6.2)	De quoi dépend la vitesse de propagation de la lumière ?
7)	Dessiner le modèle enrichi (modèle de la lumière avec intégration du paramètre vitesse) du rayon lumineux.

Questions	Réponses
1)	
2)	
3)	Un objet n'est visible que si l'œil en reçoit sa lumière.
4)	Source primaire : produit de la lumière. Objet diffusant : renvoie la lumière (d'une source primaire) dans toutes les directions.
5)	À une absence de lumière. → Face à un écran : Si un objet s'approche (respectivement : s'éloigne) d'une source de lumière, la taille de son ombre augmente (respectivement : diminue).
6.1)	Non, la vitesse de la lumière n'est pas infinie. Sa vitesse est d'environ 300.000.000 m/s (trois cents millions de mètres par seconde), soit : $c = 300.000.000 \text{ m/s}$. • En remarque , pour la lumière, <u>dans le vide</u> , on note c à la place de v (ou de $v(\text{vide})$).
6.2)	Du milieu. • Dans l'air, la lumière se propage quasiment comme dans le vide (300.000 km/s (trois cent mille kilomètres par seconde)). Dans l'eau, la lumière se propage à environ 225.000 km/s (deux cents vingt-cinq mille kilomètres par seconde).
7)	Dans le vide :  Dans l'air :  Dans l'eau : 

Fin du CHAPITRE 2

Signaux lumineux

SOURCES

Connaissances et compétences disciplinaires

- Enseignement personnel (M. Y Duplan).
- Manuel scolaire : « Physique Chimie 5^e | cycle 4, nouveau programme » (éditeur Nathan, 2016).
- Manuel scolaire : « Physique Chimie 5^e | collection 2017 » (éditeur Le Livre Scolaire, 2017).
- Cahier d'activités (*associé au manuel correspondant*) : « Cahier de Physique Chimie 5^e » (Nathan, édition 2018).

IMAGES

Contenu du cours

- *Icônes* → Microsoft PowerPoint, version 2016.
- Manuel scolaire : « Physique Chimie 5^e | collection 2017 » (éditeur Le Livre Scolaire, 2017).
- Manuel scolaire : « Physique Chimie 5^e | cycle 4, nouveau programme » (éditeur Nathan, 2016).

SOURCES

IMAGES

Activité expérimentale

- ...
- Manuel scolaire : « Physique Chimie 5^e | cycle 4, nouveau programme » (éditeur Nathan, 2016).

Activité documentaire n°1

- *Icônes* → Microsoft PowerPoint, version 2016.
- Wikipédia, « Alhazen » (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Alhazen>, accès : mars 2022).
- Wikipédia, « Jupiter (planète) » ([https://fr.wikipedia.org/wiki/Jupiter_\(plan%C3%A8te\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Jupiter_(plan%C3%A8te)), accès : mars 2022).
- Wikipédia, « Io (lune) » ([https://fr.wikipedia.org/wiki/Io_\(lune\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Io_(lune)), accès : mars 2022).
- Wikipédia, « Fibre optique » (https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_optique, accès : mars 2022).
- Manuel scolaire : « Physique Chimie 5^e | cycle 4, nouveau programme » (éditeur Nathan, 2016).

Activité documentaire n°2

- *Icônes* → Microsoft PowerPoint, version 2016.
- Wikipédia, « Léon Foucault » (https://fr.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9on_Foucault, accès : mars 2022).

Exercices

- Manuel scolaire : « Physique Chimie 5^e | collection 2017 » (éditeur Le Livre Scolaire, 2017).
- Wikipédia, « Éclipse solaire » (https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89clipse_solaire, accès : mars 2022).
- Wikipédia, « Éclipse lunaire » (https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89clipse_lunaire, accès : mars 2022).

→ Évaluation du chapitre

- *Icônes* → Microsoft PowerPoint, version 2016.
- Manuel scolaire : « Physique Chimie 5^e | collection 2017 » (éditeur Le Livre Scolaire, 2017).
- Cahier d'activités (*associé au manuel correspondant*) : « Cahier de Physique Chimie 5^e » (Nathan, édition 2018).

Figure 48. « Signaux lumineux ».

X) 19. ii. Support de l'activité expérimentale de la séquence

L'activité expérimentale est adjointe dans la **Figure 49** et dans la **Figure 50**.

5 - THÈME : Des signaux pour observer et communiquer
 CHAPITRE 2 : Signaux lumineux (5^e)

Modéliser le phénomène des ombres

ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE Couleur et ombres

Contexte
 Certains spectacles utilisent le théâtre d'ombres qui consiste à projeter, sur un écran vertical placé entre le public assis dans la salle et les danseurs sur scène, les ombres de ces derniers, à l'aide d'un projecteur situé derrière les danseurs.
 La taille de l'ombre d'un danseur change : elle peut paraître s'agrandir comme se rétrécir. De plus, l'ombre semble toujours noire.




Extrait du spectacle de la troupe Die Mobilés Disposition du matériel du spectacle

Problématique n°1 → Comment l'ombre peut-elle être grande ou petite ?
Problématique n°2 → Comment l'ombre est-elle définie ?

Hypothèse(s)
 Je pense que
 parce-que

C1 : Concevoir partiellement une expérience pour tester une hypothèse				
	4/4	3/4	2/4	1/4
C2 : Exploiter le modèle du rayon lumineux				
	8/8	6/8	4/8	2/8

Malus Non noté, non prise de correction -1 à -2 →

Rôles dans le groupe : Responsable matériel Responsable bruit
 Responsable consignes Responsable temps

Problématique n°1

Matériel
 Matériel de laboratoire :

1

1 lampe de poche Source primaire de lumière blanche (avec ampoule de tension nominale 6 V).
 1 balle blanche Objet diffusant en polystyrène (matériau opaque, c'est-à-dire qui ne laisse pas passer la lumière (contraire : matériau transparent)).
 1 écran blanc Objet diffusant fait d'une feuille blanche sur papier cartonné.

Protocole de l'expérience
 Compléter le protocole expérimental permettant de réaliser toutes les étapes de l'expérience afin de tester une hypothèse.

Placerentre.....
Allumer.....et.....
 puis observer.....
 Faire varier.....entre.....
 puis observer ce qu'il se passe concernant.....

Appeler quand c'est fini !

EXPÉRIENCE
 Réaliser l'expérience en suivant le protocole.

ANALYSE DES RÉSULTATS
 Retour sur hypothèse de départ.
 Comment l'ombre peut-elle être grande ou petite ?

Sur les deux schémas, tracer les rayons de lumière permettant d'indiquer la position de l'ombre sur l'écran.
 Légendez avec les mots suivants : ombre propre (= ombre de l'objet), ombre portée (= ombre sur écran), cône d'ombre (= zone non éclairée).




Appeler quand c'est fini !

2

Figure 49. Activité expérimentale « Couleur et ombres » (pp. 1-2).

Problématique n°2

Matériel
 Identique à la première expérience.
 + 3 filtres colorés Filtres de couleur rouge, vert et bleu.

EXPÉRIENCE
 Répéter l'expérience de la problématique n°1, en utilisant différents filtres de couleur devant la source.

ANALYSE DES RÉSULTATS
 Retour sur hypothèse de départ.
 De quelle « couleur » est l'ombre, sans filtre ? avec filtre ?

Donner une définition de l'ombre.

Appeler quand c'est fini !

SYNTHÈSE COLLECTIVE

Conclusion → CE QUE JE RETIENS

Une ombre est une (et sans couleur, elle apparaît ainsi et sombre). La couleur de l'ombre ne dépend pas de la source qui éclaire l'obstacle.

Vocabulaire :
 - le cône d'ombre est une ;
 - l'ombre propre est ;
 - l'ombre portée est

3

En projetant une ombre sur un écran :
 Si un objet s'approche (respectivement : s'éloigne) d'une source de lumière, la taille de son ombre (respectivement :).

POUR APPROFONDIR
 Le noir correspond donc à l'absence de couleur. À quoi correspond la présence de toutes les couleurs ?

Preuve : Le disque chromatique de Newton (EXPÉRIENCE) [1]

4

Figure 50. Activité expérimentale « Couleur et ombres » (pp. 3-4).

