

Chapitre 20 — La lumière : un flux de photons

→ À l'aide des documents disponibles, préparer un débat autour de la conception de la lumière, qui aurait pu avoir lieu au début du XX^e siècle, lorsque l'effet photoélectrique restait inexpliqué.

Pour cela, on pourra choisir d'incarner Albert Michelson et Lord William Kelvin, ou encore Albert Einstein et Robert Millikan, ou d'autres personnages historiques (document 3). Il est aussi possible de partir d'une réflexion sur la représentation de la lumière de la Stèle de la dame Tapéret datant de l'Antiquité (document 2).

On montrera en particulier l'importance historique de l'effet photoélectrique en précisant quelle(s) conception(s) de la lumière sembla(en)t admise(s) avant et après explication de l'effet photoélectrique.

On précisera si le modèle proposé par Einstein pour expliquer l'effet photoélectrique amène à abandonner l'autre modèle.

Un tableau d'évaluation, à consulter, est disponible après les documents.

Document 1 : Article du *Monde*, 7 juin 2005

https://www.lemonde.fr/planete/article/2005/06/07/la-lumiere-onde-et-corpuscule_659406_3244.html

La lumière : onde et corpuscule

En mars 1905, dans un article révolutionnaire, Einstein suppose que l'énergie lumineuse est quantifiée. Il fonde ainsi la théorie quantique.

La publication en mars 1905, dans *Annalen der Physik*, de l'article intitulé "Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière" est une révolution. C'est pour cette contribution que le physicien recevra en 1922 (au titre de l'année 1921) le prix Nobel de physique. L'hypothèse que formule Albert Einstein sera le fondement de la mécanique quantique : ces travaux, les premiers publiés par le jeune physicien, laissent déjà entrevoir la nature duale de la lumière, à la fois ondulatoire et corpusculaire. D'ailleurs, Einstein ne s'y trompe pas et sait que son hypothèse est particulièrement iconoclaste. Il parle donc, dans le titre de sa publication, d'un "point de vue heuristique". C'est-à-dire d'une approche pragmatique visant à expliquer certains phénomènes observés.

Pour expliquer l'effet photoélectrique, Einstein fait l'hypothèse que la lumière est constituée de petits grains transportant chacun une quantité d'énergie proportionnelle à la fréquence de leur rayonnement associé. Au début du XX^e siècle, cet énoncé publié par *Annalen der Physik* est jugé intolérable par l'ensemble des physiciens. Il le demeurera pendant plus de onze ans, jusqu'à ce que le physicien américain Robert Millikan, en cherchant à démontrer de manière expérimentale qu'Einstein a tort, finisse en 1916 par démontrer qu'il avait raison. Millikan

dira que la confirmation expérimentale de l'hypothèse d'Einstein est "indiscutable", bien qu'elle soit "déraisonnable" et qu'"elle semble contredire tout ce que les physiciens savent des interférences lumineuses".

Pourquoi une telle défiance de l'ensemble du monde scientifique ? Parce que les travaux du jeune physicien allemand remettent en cause un principe bien établi par l'expérience depuis le milieu du XIX^e siècle : la lumière est une onde. Elle n'est pas, comme le pensait Isaac Newton, dans sa vision balistique de l'optique, constituée de petits projectiles. Pour preuve, la manipulation de Thomas Young. Celle-ci utilise une source lumineuse qui éclaire un écran percé de deux fentes. Au-delà de ces deux orifices, un écran recueille la lumière. Des franges d'interférences - c'est-à-dire des alternances de stries sombres et lumineuses - apparaissent et trahissent la nature irrémédiablement ondulatoire de la lumière, car seules les ondes peuvent ainsi interférer. La lumière ne peut donc pas raisonnablement être corpusculaire. Elle est seulement ondulatoire.

Erreur ! Elle est aussi discontinue, comme la matière, comme les flux électriques. Ce paradoxe profond, cette dualité, Einstein la pressent clairement en mars 1905. L'énergie lumineuse dépend en effet, selon la formulation d'Einstein, de la fréquence de l'onde associée. Quantifiée, cette énergie suppose cependant l'existence d'une unité élémentaire de la lumière qui portera plus tard le nom de photon.

DES "VARIABLES CACHÉES"

Max Planck avait certes franchi un premier pas au tout début du XX^e siècle, dans son interprétation du phénomène dit du "rayonnement du corps noir", en introduisant la constante qui porte son nom et en formulant l'hypothèse que les échanges d'énergie entre lumière et matière se faisaient de manière quantifiée. Mais l'idée que c'est la lumière elle-même qui est granulaire semble par trop iconoclaste.

La théorie quantique, ainsi née en mars 1905, se montrera, de nombreuses années plus tard, d'une prodigieuse efficacité pour expliquer un très grand nombre de phénomènes. Elle a résisté, jusqu'à présent, à toutes les expérimentations qui ont tenté de la mettre en défaut. Mais, de manière assez paradoxale, Einstein, véritable fondateur de cette théorie, ne participera pas réellement à son développement et à sa formalisation ultérieurs, dans les années 1920 et 1930. D'autres physiciens s'en chargeront. Le physicien d'origine allemande entretiendra d'ailleurs, tout au long de sa vie, des relations ambiguës avec sa capricieuse créature.

Capricieuse, car, malgré ses succès, elle ne correspond pas à l'image que se fait Einstein de l'ordre des choses. Elle prévoit que le comportement des particules élémentaires ne peut pas être prévu de manière certaine et unique, les composants élémentaires du monde se comportant de manière fondamentalement probabiliste. C'est cette étrangeté de la physique quantique qui amènera Einstein à prononcer ce mot resté fameux : "Dieu ne joue pas aux dés !"


Confronté sur ce point au grand physicien danois Niels Bohr, Einstein n'a de cesse de montrer que la théorie quantique, telle qu'elle a été développée depuis sa naissance en mars 1905, est non pas fautive, mais incomplète. Il y manque des paramètres, des "variables cachées". En 1935, dans la *Physical Review*, le grand physicien publie, avec Nathan Rosen et Boris Podolsky, un article qui doit mettre en déroute la pensée de Bohr. Les trois hommes mettent en évidence un paradoxe qui prouve à coup sûr que la théorie quantique est imparfaite, qu'il y manque

un niveau sous-jacent de description. Einstein, Podolsky et Rosen montrent que le formalisme quantique autorise une magie inconcevable. Si deux particules quantiques se heurtent, elles demeurent ensuite irrémédiablement liées. Même distantes de plusieurs milliers de kilomètres, elles se comportent comme un seul et même objet : que la première soit perturbée, et la seconde en subit immédiatement les effets. C'est le paradoxe dit EPR (Einstein, Podolsky, Rosen), dont Einstein estime qu'il est la démonstration des imperfections de la théorie quantique.

En réalité, ce paradoxe n'en est pas un et, en 1982, des chercheurs français mettent en évidence la réalité physique de ce phénomène, dit de l'intrication. Jusqu'à la fin de sa vie, Einstein a donc cru incomplète la théorie qu'il avait contribué à inventer en mars 1905. Sur cet unique point, il avait tort. À moins que l'avenir ne finisse par lui donner raison. Qui sait...

Stéphane Foucart

Document 2 : Les premiers modèles de la lumière



Antiquité

vers 1020

vers 1250

Les philosophes antiques s'intéressent plus à la vision qu'à la nature de la lumière, mais on peut distinguer :


- les **pythagoriciens** qui admettent l'émission de particules ;
- les **aristotéliens** dont les hypothèses se rapprochent d'une conception ondulatoire de la lumière.

Alhazen (Ibn al-Haytham) *Traité d'optique*

Suite à une vraie méthode expérimentale, Alhazen conclut que la « plus petite des lumières » se comporte comme un corps pesant.

Robert Grossetête

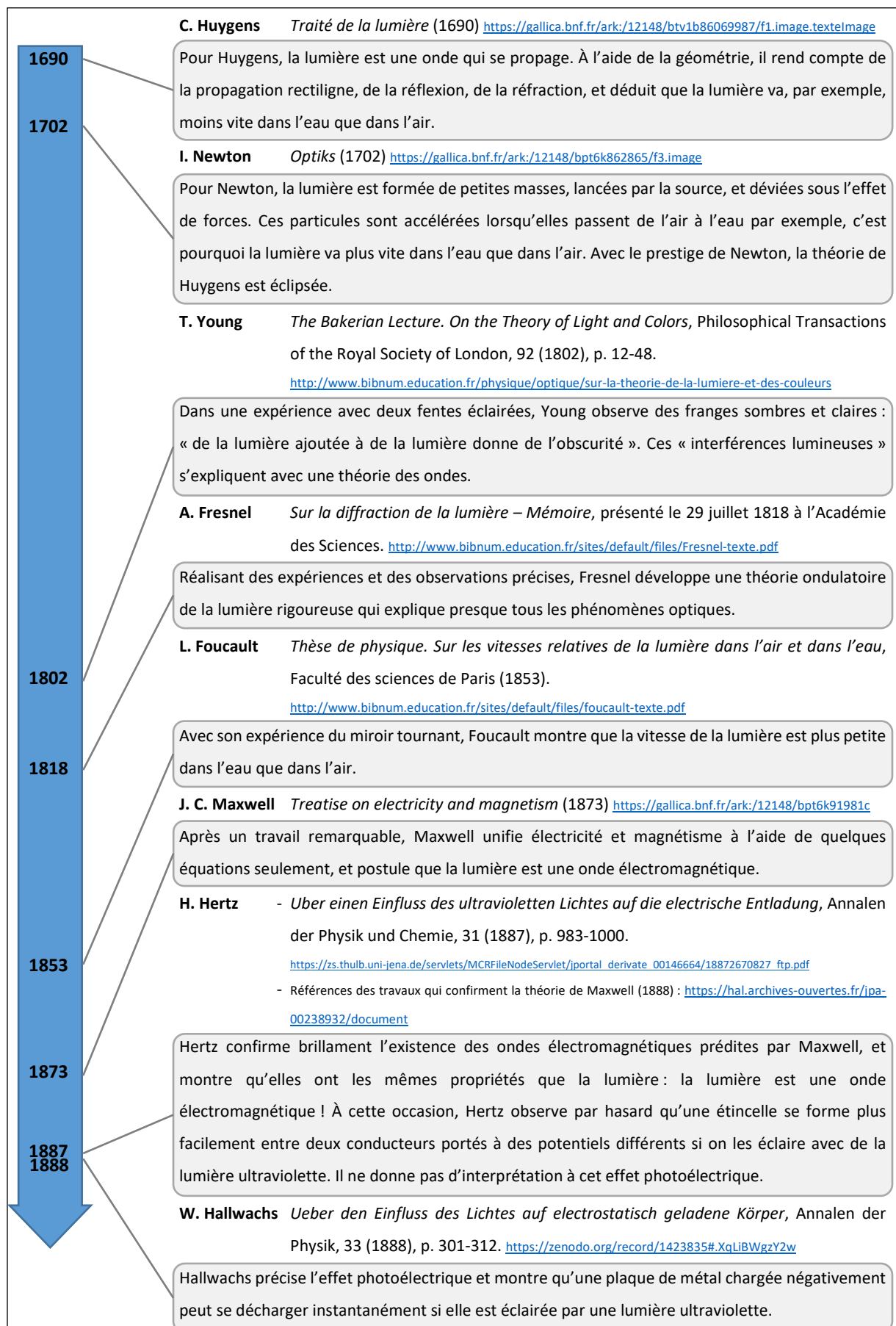
Pour Grossetête, la lumière effectue des battements, analogues au son, qui se propagent dans « l'éther ».

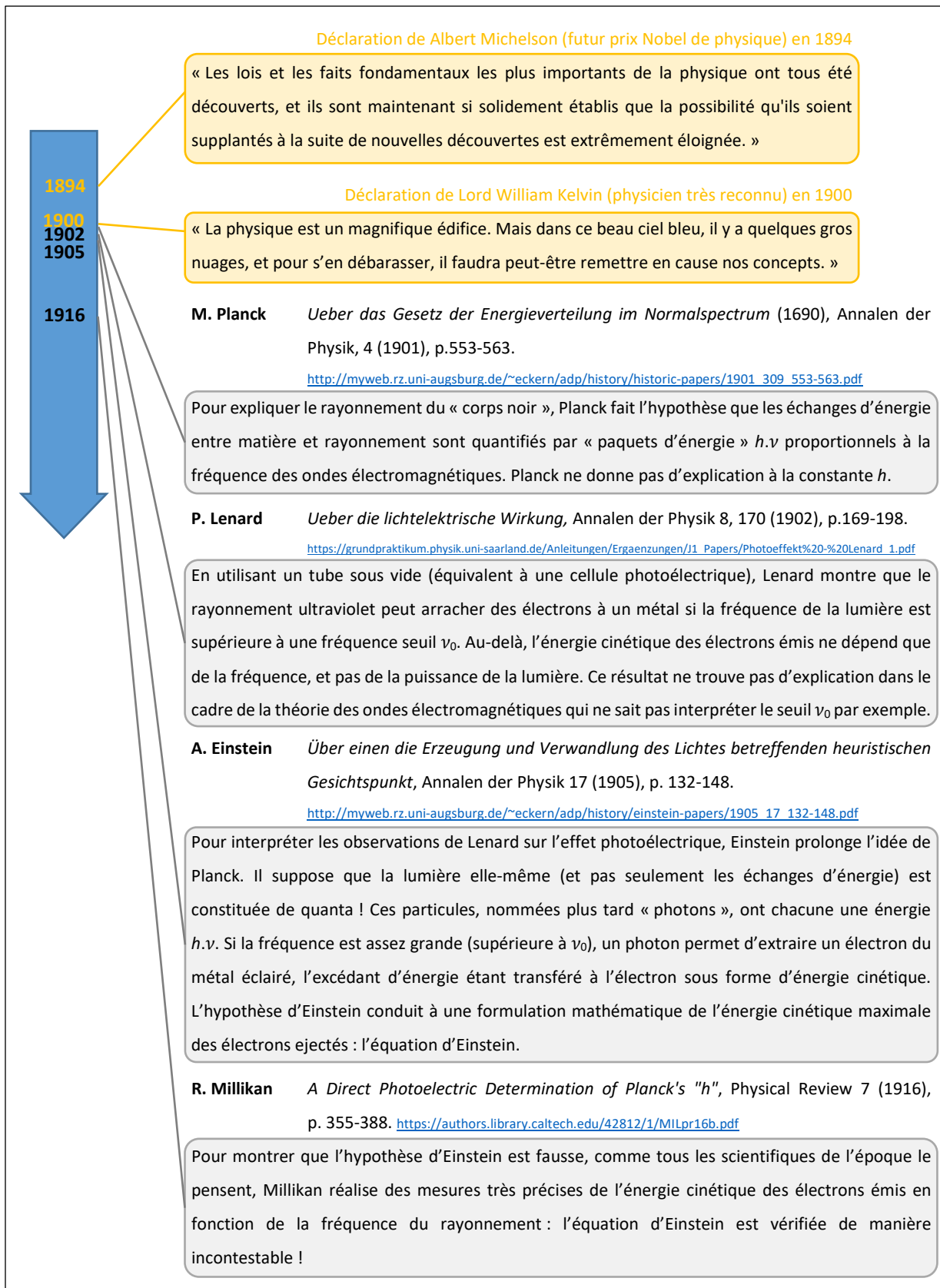


Stèle de la dame Tapéret (X^e ou IX^e siècle avant J.-C.), Musée du Louvre.

Le dieu à tête de faucon Rê-Horakhty, symbolisant le soleil à son zénith, envoie des rayons formés de fleurs colorées.

Document 3 : Quelques travaux sur la conception de la lumière au cours des derniers siècles





		Évaluation			Remarques supplémentaires
		Insuffisant	En cours	Satisfisant	
Contenu scientifique	Distinction des deux modèles particulière et ondulatoire qui s'opposent avant le XX ^e siècle				
	Bonnes associations scientifique / modèle				
	Mise en évidence de la pertinence du modèle ondulatoire avant le XX ^e siècle				
	Évocation du lien entre le modèle particulière proposé par Einstein et le modèle ondulatoire				
Présentation	Sans note				
	Synthétique				
	Vocabulaire adapté et rigoureux				
	Élocution fluide				
La présentation correspond à un débat	Des registres contrastés d'expression sont utilisés				
	Les arguments sont apportés aux instants opportuns				