

James Clerk Maxwell



Résumé

James Clerk Maxwell (1831 – 1879) est passé à la postérité auprès de tous les étudiants en physique pour ses fameuses équations qui décrivent en termes mathématiques le comportement des champs électriques et magnétiques. Avec ces équations, Maxwell réalisa l'unification du magnétisme, de l'électricité et de l'optique : il prédit l'existence d'ondes électromagnétiques se propageant à la vitesse de la lumière et en déduisit que la lumière devait être elle-même une onde électromagnétique. Si ces travaux ne furent pas pris au sérieux de son vivant, les expériences d'Heinrich Hertz les validèrent près de 10 ans après sa mort. Mais à son époque, c'est surtout pour ses travaux sur la vision des couleurs, un sujet alors très à la mode, que Maxwell fut connu. Il fut le premier à prouver, notamment en faisant tourner des disques colorés, la validité de la théorie trichromatique de Young. Il réalisa également la première photographie couleur, qu'il montra à la Royal Institution de Londres en 1861. Maxwell est moins connu du grand public que Newton et Einstein, mais il est certainement le physicien du 19^{ème} siècle qui aura eu le plus d'influence sur les grandes découvertes du 20^{ème} siècle que sont la relativité et la mécanique quantique. Il a vécu en pleine révolution industrielle, à une époque où des liens de plus en plus étroits se tissent entre la science et les intérêts économiques.

Biographie

James Clerk Maxwell est né en 1831 à Edimbourg, en Ecosse, dans une famille de la petite noblesse écossaise (son père était avocat). Il retourne peu de temps après sa naissance à la campagne dans la maison familiale de Glencair. Sa mère décède en 1839, et ce sera ensuite son père qui l'initiera à la culture scientifique industrielle de l'époque et qui influencera fortement son avenir professionnel. Enfant, il était d'une curiosité insatiable sur tout demandant tout le temps : « Show me how it doos' » ou « What's the go o'that ? ».

En 1841, il entre à l'Académie d'Edimbourg. Il est surnommé « Dafty », le cinglé, l'idiot, le farfalu en écossais, en raison de son accent campagnard, de ses vêtements bigarrés et d'un comportement singulier. Il lit Newton et Young et son père (et son oncle) l'emmène régulièrement aux réunions de la Society of Arts et de la Royal Society. En 1845, il rencontre David Hay, peintre connu à Edimbourg qui soutient que la beauté des formes et des couleurs dans l'art peut être réduite à des principes mathématiques. Cette rencontre influencera les travaux de Maxwell sur la couleur. A 15 ans, il réalise

ses premiers travaux de géométrie qui montrent qu'il maîtrise déjà les contributions de Descartes, Huygens et Newton à l'optique et à la géométrie.

En 1847, il entre à l'Université d'Edimbourg. Les étudiants y disposent d'une grande liberté et Maxwell fréquente assidument les laboratoires de ses professeurs. Ces centres d'intérêt principaux sont les mathématiques et la physique. Il publie pendant cette période deux articles, dont un sur l'équilibre des corps élastiques.

En 1850, il entre à Cambridge au St. Peters College, puis au Trinity College quelques mois plus tard. L'objectif principal des étudiants de Cambridge était alors de réussir les examens finaux pour l'obtention du diplôme, les « Mathematical Tripos ». Le tuteur de Maxwell sera William Hopkins, un des meilleurs professeurs de mathématiques de Cambridge, et Maxwell sera reçu 2^{ème} à ces examens (il aura le même nombre de points qu'un prédécesseur célèbre : William Thomson, le futur Lord Kelvin). Il est d'ailleurs en contact régulier avec ce même William Thomson depuis 1850 et développe un intérêt pour l'électricité, le magnétisme et la thermique.

En 1855, il décroche un poste de Fellow au Trinity College où il dispense un cours d'hydrostatique et d'optique. Il écrit « On Farady's lines of Force », son premier article sur la théorie des phénomènes électromagnétiques. En 1856, il part au Marischal College d'Aberdeen en Ecosse, où il enseigne la philosophie naturelle. En 1857, il reçoit l'Adams Prize pour son mémoire sur la stabilité des anneaux de Saturne, qui sera publié en 1859. En 1858, il se fiance à la fille du recteur Katherine Mary Dewar.

En 1860, son poste à Aberdeen est supprimé et Maxwell prend une chaire de philosophie naturelle au King's College de Londres. Pendant les 5 années qu'il passera à Londres, il achèvera sa théorie électromagnétique. En 1865, il renonce à ses fonctions, d'après lui pour se consacrer entièrement à ses recherches. Entre 1865 et 1866, il est modérateur et examinateur pour les Mathematical Tripos de Cambridge. En 1871, il est élu premier Professeur de physique expérimentale à Cambridge et fonde ce qui deviendra le Cavendish Laboratory. Il aura une activité scientifique intense jusqu'à sa mort en 1879 (il mourra de la même maladie que sa mère, sans doute une forme de néoplasie abdominale).

Contexte historique

D'un point de vue politique, la période est plutôt calme puisque la reine Victoria règne sur le Royaume Uni (appelé ainsi depuis 1801) de 1837 à 1901. Au 19^{ème} siècle, porté par la révolution industrielle, le Royaume Uni devient la première nation industrialisée : en 1845, le pays compte la moitié des kilomètres de rails européens. Le développement de la colonie australienne contribue à sa richesse et à son rayonnement mondial. D'un point de vue social, un mouvement appelé le chartisme mobilise des millions de personnes pour obtenir le suffrage universel. Le syndicalisme prend forme dans les années 1860.

Maxwell et la lumière : expériences et apports

L'étude de la lumière a été l'un des principaux sujets de recherche de Maxwell. Cet intérêt a débuté en 1847 par la visite du laboratoire d'optique de William Nicol (Maxwell a alors 16 ans) où étaient réalisées des expériences sur la polarisation de la lumière.

L'ELECTROMAGNETISME

Ce qui fait la grande notoriété de Maxwell aujourd'hui, c'est son travail théorique sur les ondes électromagnétiques.

Maxwell cherche à expliquer les phénomènes électriques et magnétiques connus à l'époque suite aux travaux d'Ampère, de Faraday et autres, par une approche très novatrice. Quand tout le monde ou presque regardait du côté de la gravitation et des modèles mécaniques, il utilise des « analogies » pour aboutir à des relations mathématiques qui expliquent les valeurs des champs électriques et magnétiques partout et à tout instant, ainsi que leur propagation, sans faire d'hypothèses mécaniques sur le milieu « support » (le fameux éther). Pour lui, ce sont les propriétés électriques et magnétiques de l'espace qui comptent, et pas les propriétés mécaniques. Il arrive ainsi aux conclusions suivantes : les ondes électromagnétiques se propagent sans action instantanée à distance, cette propagation dépend du milieu traversé, l'introduction d'un éther est indispensable. Toutes ces conclusions sont contre les interprétations newtoniennes de l'électromagnétisme (mais en accord qualitatif avec ce qu'avait déjà suggéré Faraday). Il va aller plus loin dans un mémoire de 1864 présenté à la Royal Society « A dynamical theory on the electromagnetic field », puis dans son « Treatise on electricity and magnetism » dont la première édition fut publiée en 1873, en disant que la lumière est une onde électromagnétique. Il écrit : « *En plusieurs (occasions), on a tenté d'expliquer les phénomènes électromagnétiques par une action mécanique transmise d'un corps à un autre par l'intermédiaire d'un milieu qui remplirait l'espace compris entre les corps. La théorie ondulatoire de la lumière suppose aussi l'existence d'un milieu. Nous avons maintenant à montrer que le milieu électromagnétique a des propriétés identiques à celles du milieu où se propage la lumière. ... Si l'on trouve que la vitesse de propagation des perturbations électromagnétiques est la même que la vitesse de la lumière (connue précisément depuis les mesures de Hippolyte Fizeau en 1849), et cela non seulement dans l'air mais dans tous les autres milieux transparents, nous aurons de fortes raisons de croire que la lumière est une onde électromagnétique* ». Et c'est ce qu'il trouve : tous les phénomènes lumineux peuvent s'expliquer à partir de l'onde électromagnétique, la lumière est donc une onde électromagnétique ! Il réalise ainsi une unification considérable entre des champs jusqu'alors séparés de la physique : l'électricité, le magnétisme et l'optique. Cette découverte sera appelée plus tard la seconde grande unification de la physique, la première ayant été réalisée par Newton avec la gravitation universelle.

Chose remarquable (mais finalement assez classique dans l'histoire des sciences), personne n'a vraiment pris au sérieux ses travaux de son vivant et aucune vérification expérimentale ne fut testée. Ce n'est qu'en 1885, soit 6 ans après sa mort, qu'Heinrich Hertz qui ne connaissait pas les travaux de Maxwell découvre des ondes produites par une source électromagnétique (les ondes hertziennes) qui se déplacent à 300 000 km/s comme la lumière. La théorie de Maxwell est enfin admise. En 1895, Röntgen découvre les rayons X : la lumière n'est qu'un cas particulier d'onde électromagnétique, correspondant à un domaine de fréquence très réduit auquel les photorécepteurs de l'œil sont sensibles. Ce sont ces travaux qui conduiront au 20^{ème} siècle aux théories de la relativité restreinte et de la mécanique quantique et qui feront dire à Einstein en 1931, pour le centenaire de la naissance de Maxwell, que ses travaux ont été les « *plus profonds et fructueux que la physique ait connus depuis le temps de Newton* ».

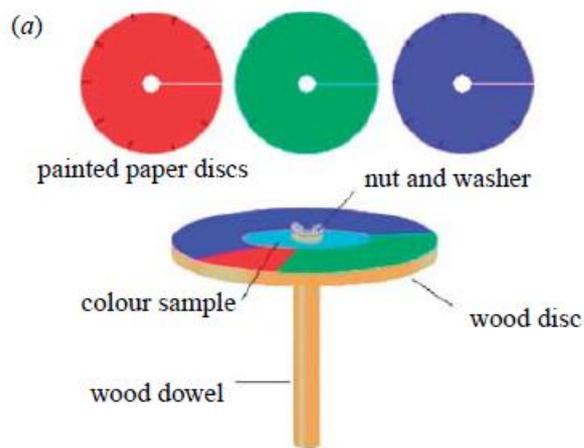
LA VISION DES COULEURS

Maxwell a construit entre 1850 et 1870 une théorie de la vision des couleurs, mais c'est en réalité toute sa vie qu'il s'est intéressé à l'optique.

Ses parents étaient déjà fascinés par les jouets d'optique qui existaient dans les années 1830, comme le zootrope inventé en 1834 par William Horner et dont le fonctionnement est basé sur le phénomène de persistance rétinienne. Dans le zootrope, les images sont peintes sur un ruban collé à l'intérieur d'un cylindre en rotation et vues à travers des fentes dans le cylindre. James et sa cousine Jemma se sont beaucoup amusés avec ces jouets et James avant même l'âge de 10 ans avait déjà inventé de nouveaux dessins (choses amusantes, Maxwell proposa en 1861 d'améliorer la performance du zootrope en insérant des lentilles concaves à la place des fentes).

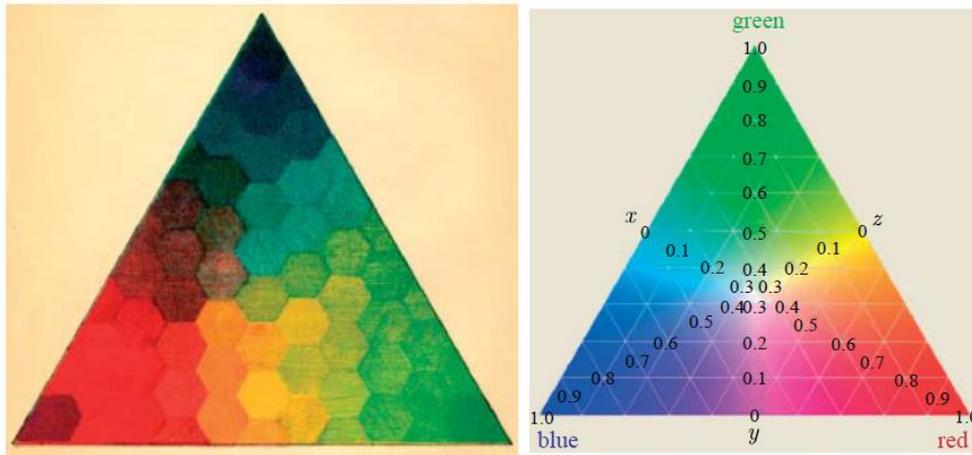
Maxwell débute ses recherches sur la vision des couleurs en 1849, à l'âge de 18 ans. C'est alors un sujet très à la mode, en particulier en Grande Bretagne, depuis les travaux pionniers de Thomas Young qui dès 1801 suggérait que notre vision des couleurs reposait sur l'existence de trois récepteurs différents présents dans nos yeux. En 1830, Young et Herschel expliquèrent notamment que l'incapacité de John Dalton, un scientifique connu pour avoir introduit la théorie atomique, à distinguer certaines couleurs était due à l'absence d'un de ces récepteurs.

Maxwell démontre dès 1855 que toutes les sensations colorées peuvent être reproduites par le mélange de trois couleurs primaires que sont le rouge, le vert et le bleu (une couleur dépend de trois paramètres indépendants : sa « rougeur », son « bleuté » et sa « verdure »). La question du mélange des couleurs et du nombre de couleurs primaires était une question controversée à l'époque : certains pensaient que les couleurs primaires étaient les 7 couleurs de l'arc-en-ciel mentionnées par Newton, d'autres, les peintres notamment avaient eu l'habitude d'utiliser la triade jaune, rouge et bleu. Maxwell utilise pour arriver à ce résultat un dispositif de disques composés de secteurs dont il peut changer la taille et les couleurs. En faisant tourner le disque, une nouvelle couleur apparaît, ce qui lui permet d'écrire des équations. Par exemple : disque périphérique avec R, V et B, central avec N et B, permet d'écrire : $0.37R + 0.27B + 0.36V = 0.28B + 0.72N$.



Maxwell à l'âge de 24 avec sa « toupie » (Longair, Maxwell and the science of colour, 2008)

Il montre que le mélange des couleurs obtenu à l'aide des disques, comme pour les mélanges des couleurs du spectre, est un phénomène additif (jaune et bleu ne produit pas de vert), contrairement à ce qui se passe quand on mélange des pigments où le mélange est soustractif avec absorption de couleurs par les pigments. Il montre aussi que ces trois paramètres sont équivalents à une description des couleurs (suggérée par un autre physicien appelé Grassmann) en terme de saturation, de luminosité et de couleur spectrale. Il introduit un triangle pour repérer les couleurs, avec aux trois sommets le rouge, le vert et le bleu. Il construira plus tard une boîte à couleur qui lui permettra de mélanger directement les couleurs du spectre sans rotation, et de les comparer à la lumière blanche.



Triangle des couleurs original et dans sa version moderne (d'après Longair, « Maxwell and the science of colour », 2008)

Ces résultats avec ceux d'autres physiciens de l'époque, notamment Helmholtz, ont jeté les bases de notre conception moderne des couleurs. Le codage RVB est à la base du fonctionnement des écrans d'ordinateurs : quand nous devons définir une couleur, nous choisissons les quantités de rouge, de vert et de bleu (généralement codées par des nombres entre 0 et 256).

Maxwell montrera également la première photographie couleur lors d'une conférence qu'il donnera au siège de la Royal Institution de Londres sur le thème des couleurs en 1861. Pour cela, il fait réaliser par Thomas Stutton (inventeur de la caméra réflexe à une lentille) trois photographies (noir et blanc) d'un ruban coloré prises respectivement derrière trois filtres rouge, vert et bleu. Ces trois photographies sont ensuite éclairées avec trois projecteurs utilisant les mêmes filtres et les images obtenues sont superposées pour retrouver la couleur d'origine du ruban. La démonstration n'aurait pas été pleinement réussie, notamment parce que les plaques utilisées par Stutton n'étaient pas sensibles au rouge et presque pas au vert. En tous cas, les principes de la photographie couleur et de l'impression par quadrichromie étaient là ! Dans l'impression par quadrichromie, on superpose une image cyan (colorant qui absorbe le rouge), une image jaune (colorant qui absorbe le bleu) et une image magenta (colorant qui absorbe le vert) pour reproduire sur du papier une image en couleur.

Maxwell s'intéressera également aux « causes » de ces trois couleurs primaires, qui sont pour lui comme pour Young à rechercher non dans la nature de la lumière mais dans la constitution de l'œil. En 1871, il donne une leçon intitulée « On colour vision » dans le cadre des discours du vendredi soir à la Royal Institution, rendez-vous habituel de la vie intellectuelle londonienne et il dit : « Voir, c'est voir en couleurs, parce que ce n'est qu'à travers l'observation des différences de couleurs que nous distinguons les formes des objets. Et lorsque je parle de différences de couleurs, j'inclus également les différences de luminosité et d'ombre. C'est justement à la royal Institution, vers le début du siècle que Thomas Young fit la première référence claire à cette doctrine de la vision des couleurs que je me propose d'illustrer. L'affirmation de Young peut être résumée par la proposition suivante : nous sommes capables de percevoir trois sensations de couleurs différentes. Les divers types de lumière excitent en proportions différentes ces sensations, et c'est au travers des différentes combinaisons de ces trois sensations primaires que toute la variété de couleur visible est reproduite. Dans cette proposition, un mot doit attirer notre attention en particulier. Ce mot est « sensation ». Il peut sembler évident de dire que la couleur est sensation : pourtant Young, reconnaissant honnêtement cette vérité élémentaire, établissait la première théorie cohérente de la couleur. Pour ce que j'en sais, Thomas Young a été le premier, qui partant du fait bien connu qu'il existe trois couleurs primaires, rechercha l'explication de ce fait non dans la nature de la lumière mais dans la constitution de l'homme. »

D'après Maxwell et conformément à l'intuition de Young, notre vision des couleurs repose sur l'existence de trois récepteurs qui sont plus ou moins stimulés par une radiation lumineuse en fonction de sa longueur d'onde (sa couleur spectrale). La physiologie moderne lui donnera raison puisqu'on découvrira trois types de photorécepteurs sur la rétine (les cônes) sensibles à des zones différentes du spectre. Maxwell s'intéresse aussi aux questions philosophiques posées par la vision des couleurs : quel est le rôle de l'esprit, des processus mentaux dans les mécanismes perceptifs ? L'esprit est-il matériel ? Et la conscience, l'âme ? Il est persuadé que la réponse à ces questions ne se limite pas à la physique. Là encore, ses intuitions seront confirmées dans les années 50 par des études sur le rôle du cerveau dans le traitement des signaux visuels et la perception des couleurs (prix Nobel de David Hubel et de Torsten Wiesel de 1981).

Ce qui est intéressant, c'est que ces questions et ces préoccupations, se rapprochent beaucoup de celles d'Aristote : rapport entre couleur, lumière et vision ; explication des mélanges de couleurs ; etc.

AUTRES SUJETS

Maxwell est également connu pour ses travaux de physique statistique (la distribution de Maxwell-Boltzmann, le démon de Maxwell).

Comment se pratique la science à cette époque ?

La deuxième moitié du 19^{ème} siècle est marquée par un formidable développement industriel. Et après une première phase (fin 18^{ème} et début 19^{ème}) basée sur des inventions et des améliorations empiriques, ce développement est directement influencé par les avancées scientifiques. La recherche devient de plus en plus « appliquée » : on ne s'intéresse plus à la nature profonde des phénomènes (électricité, chaleur) mais à la façon dont ils vont pouvoir être appliqués. C'est l'époque du positivisme triomphant, le progrès est présenté comme l'œuvre de la civilisation industrielle. En Angleterre, on donne des titres et des pensions à des scientifiques pour faire de la recherche, en France, on organise des concours de recherche appliquée (Napoléon III commence son règne en offrant un prix à qui rendra la pile de Volta applicable à l'économie), mais le nombre de scientifique reste encore très limité : quelques centaines dans l'ensemble des grands pays industriels. Bernard Maitte écrit : « *La science qui s'est coupée de la philosophie, trouve un nouveau cadre dans lequel s'épanouir : celui de la société industrielle. L'une et l'autre suivant chacune le cours de la logique de leur développement, vont s'unir pour transformer le monde de façon irréversible.* » C'est donc la période où les liens deviennent étroits entre science et industrie. Quelqu'un comme Thomson avait 70 brevets, en particulier dans le secteur des câbles sous-marins et de la navigation. Ce ne semble pas avoir été le cas de Maxwell, qui passera néanmoins beaucoup de temps dans les usines à observer le fonctionnement des machines, fonctionnement qui sera à la base de sa théorie électromagnétique.

La deuxième moitié du 19^{ème} siècle est aussi marquée par la naissance des premiers laboratoires de recherche universitaire, naissance dans laquelle Maxwell jouera un rôle important. En 1871, il devient le premier Professeur de Physique Expérimentale à l'Université de Cambridge, après avoir œuvré activement pour sa création (d'autres scientifiques célèbres de l'époque avaient refusé le poste : Thomson, Helmholtz). Jusqu'ici, pour des raisons idéologiques et financières, on ne faisait peu ou pas d'expérimentation dans les enseignements universitaires et on s'intéressait peu aux derniers développements scientifiques. On enseignait des faits, à travers des cours et des livres, suivis d'exercices de récitation et de mémorisation, mais peu d'efforts étaient dévolus à l'enseignement de

la méthode inductive et la science expérimentale. Dans les années qui suivront sa nomination, Maxwell donnera des leçons de physique expérimentale aux étudiants, leçons dans lesquelles il fera part de ses réflexions sur la méthodologie et les buts de la recherche. Il soulignera toujours l'importance conjugée des mathématiques et de la physique expérimentale qui constituent pour lui la seule façon de se représenter correctement les phénomènes observés. Dans sa leçon de 1871, il parle aussi de l'importance de l'histoire des sciences : « *L'étude de la science ne se limite pas à l'énumération des études couronnées de succès. Elle doit aussi évoquer les recherches qui ont rencontré l'échec, et expliquer pourquoi certains des hommes de science les plus doués ont échoué dans la recherche de la clé de la connaissance, et de quelle façon la réputation d'autres hommes n'a contribué à rien d'autre que de fournir des bases plus solides aux erreurs dans lesquelles ils s'étaient fourvoyés.* »

Il crée ensuite un véritable laboratoire de recherche, achevé en 1874, qui existe encore aujourd'hui (le Cavendish Laboratory) et qui sera à la fin du 19^{ème} et au début du 20^{ème} siècle un des laboratoires les plus importants dans le monde. D'autres laboratoires se développent notamment en Grande Bretagne à la même époque autour de grands scientifiques : Thomson à Glasgow (1868), Clifton à Oxford (1868), Balfour Stewart à l'Owens College (1870).

Particularités

Des écrits nous permettent de mieux comprendre l'état d'esprit de Maxwell jeune chercheur. Il écrit (à 23 ans) : « *Heureux l'homme qui peut reconnaître dans le travail d'Aujourd'hui une partie liée au travail d'une vie, et une incarnation du travail de l'éternité. Sa confiance a des fondements immuables, parce qu'il a été fait pour prendre part à l'infini. Il construit vaillamment jour après jour ses entreprises, puisque le présent lui est donné pour qu'il se l'approprie. ... L'Homme devrait être une personification du processus divin de la nature, et montrer clairement l'union de l'infini avec le fini, sans humilier son existence temporelle, se rappelant que ce n'est qu'en elle que l'action individuelle est possible, et sans exclure de sa vue ce qui est éternel* ». La recherche est pour lui un travail où chaque jour apporte une pierre à l'œuvre de sa vie. Le Royaume de Dieu se fonde sur la terre, en donnant pleine confiance aux capacités de l'être humain et en exploitant ses capacités créatrices.

Deux particularités méritent d'être soulignées, au-delà de l'intelligence exceptionnelle de Maxwell. Tout d'abord, il sera profondément marqué par des figures importantes du mouvement socialiste chrétien dont il était proche et dont l'un des objectifs était d'améliorer le sort des ouvriers. Il participera ainsi à la courte expérience du « Working Men's College » de Cambridge dont le but était de donner des cours du soir aux ouvriers. Maxwell poursuivra cette activité à Aberdeen et à Londres jusqu'en 1866.

Ensuite, dans les dernières années de sa vie, Maxwell consacra une part importante de son temps à diffuser la culture scientifique. Son objectif était double : diffuser une culture scientifique correcte, mais aussi développer l'esprit critique. « *Maxwell affirme que le respect pour la science qui découle des avancées technologiques est tel que les opinions les plus absurdes peuvent être acceptées tant qu'elles sont exprimées dans un langage évoquant certaines affirmations scientifiques connues. Si la société est à ce point prête à recevoir n'importe quelle doctrine, conclut Maxwell, le scientifique a le devoir non seulement de diffuser une culture scientifique correcte, mais aussi de susciter un sain esprit critique, fondé sur un examen rigoureux des preuves dont dépendent les affirmations dites scientifiques.* » Il sera chargé en 1873 avec T. Huxley des sections scientifiques de la neuvième édition de l'Encyclopedia Britannica, pour laquelle il écrivit divers articles.

Bibliographie

Wikipédia

La Lumière, Bernard Maitte

Maxwell, Les génies de la Science

Maxwell and the science of colour, M.S.Longair, Phil. Trans. R. Soc. A (2008) 366, 1685-1696