

lumière, mais par réflexions successives sur des miroirs identiques.

Quand Bouguer a écrit son *Essai*, il ne connaissait pas les travaux du capucin. C'est bien plus tard, à la fin de sa vie, après nombre d'autres aventures (voir l'encadré page 79), qu'il a critiqué ces dispositifs, dans un *Traité d'optique* publié de manière posthume en 1760. Bouguer a reproché principalement deux choses au moins. D'une part, sa mesure dépendait de la vue de l'opérateur – une faiblesse dont le capucin était lui-même déjà bien conscient. D'autre part, Bouguer avait lui aussi étudié l'atténuation de la lumière à travers un empilement de plaques de verre et l'échelle des degrés qu'il avait obtenue ne correspondait pas à celle du religieux. En fait, tout porte à croire que le capucin a juste présenté des concepts et ne les a pas expérimentés. Il n'a d'ailleurs donné aucun conseil pratique pour la fabrication de ses lucimètres.

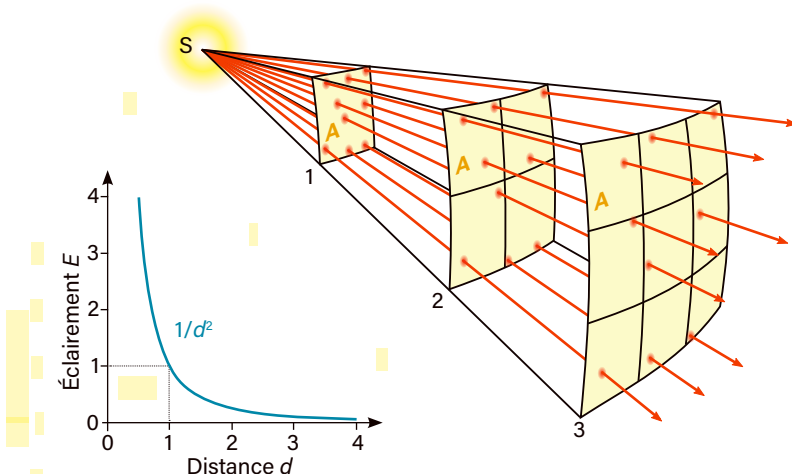
Ainsi, quand le jeune Bouguer se penche sur la question soulevée par Dortous de Mairan, le

champ est plutôt libre. Pour répondre au savant, il choisit une approche cartésienne: diviser en problèmes élémentaires plus simples et agencer de manière logique les différentes étapes de la démonstration. L'Académicien avait formulé sa question ainsi: comment quantifier la différence de lumière reçue entre les deux positions extrêmes du Soleil à l'aplomb – celles des solstices d'été et d'hiver – ou entre deux hauteurs du Soleil le même jour qui correspondraient à celles de l'astre aux solstices? Bouguer subdivise sa démonstration en deux étapes.

Dans la première, il ramène la mesure de l'éclairement à une autre plus aisée en rappelant une loi « reconnue de tous les lecteurs qui sont initiés dans l'optique »: l'éclairement en un point varie inversement au carré de la distance de la source lumineuse à ce point. Cette loi, dite « des carrés inverses » (voir l'encadré ci-dessous) associe une variation de luminosité à une simple mesure de distance. Dans la seconde, il règle le problème de la détection en remarquant que l'œil humain est un bon

LA LOI DES CARRÉS INVERSES

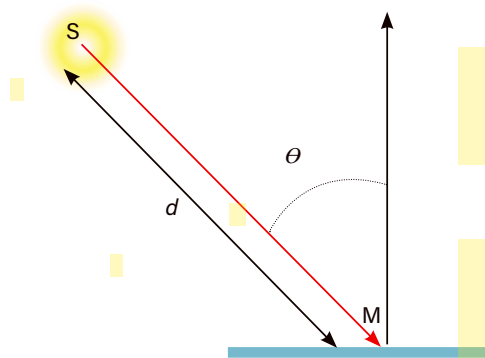
Dès le début de son *Essai d'optique*, Pierre Bouguer explicite la loi de décroissance de l'éclairement avec le carré de la distance à la source lumineuse. Cette loi a été établie en 1604 par l'astronome allemand Johannes Kepler dans son livre *Astronomiae pars Optica*. Pour la comprendre, il faut bien saisir qu'un éclairement est une densité de flux lumineux par unité de surface. Or si dans un cône partant de la source ponctuelle S, un flux de lumière traverse une surface élémentaire A à une distance $d = 1$, la surface traversée a une aire quatre fois plus grande à la distance $d = 2$, et neuf fois plus grande à la distance $d = 3$ (ci-contre à droite). La densité de flux sur la surface A diminue bien avec l'inverse de la distance au carré.



Pour compléter la relation entre l'éclairement $E(M)$ en un point M et l'intensité I_0 d'une source de lumière, il faut prendre en compte l'orientation de la lumière par rapport à la normale au détecteur. En 1760, dans son *Photometria*, le mathématicien suisse Johann Heinrich Lambert a établi que la variation se fait selon une loi en cosinus. L'expression générale s'écrit :

$$E(M) = \frac{I_0}{d^2} \cos \theta$$

Cette relation n'est strictement valable que si la source est ponctuelle, et en pratique pour des distances d beaucoup plus grandes que la taille de la source. Pour cette raison, cette approximation est dite « en champ lointain ». Les calculs en champ proche sont plus fastidieux puisqu'ils nécessitent de découper la source étendue en surfaces d'aire élémentaire, de déterminer la contribution à l'éclairement de chacune d'elles, et enfin de sommer ces éclairissements élémentaires. Cette loi dite « de Bouguer » devrait donc plutôt s'appeler « loi de Kepler-Bouguer-Lambert »... En revanche, la loi dite « de Beer-Lambert » devrait s'appeler « loi de Bouguer » : Bouguer fut le premier à présenter – dans son *Essai d'optique* – des mesures d'atténuation de la lumière à travers des couches d'eau ou des plaques de verre et à montrer que cette atténuation suit une loi exponentielle décroissante en fonction de l'épaisseur du milieu traversé. Mais c'est une autre histoire !



La bougie est restée l'unité d'intensité lumineuse jusqu'en 1954

comparateur de luminosités. En particulier, il est capable de détecter si les éclairagements entre deux zones adjacentes illuminées simultanément par deux sources de lumière sont égaux. C'est cette propriété que Bouguer utilise pour effectuer sa mesure : une fois assurée l'égalisation des éclairagements des deux sources à comparer, le rapport des intensités lumineuses est égal au rapport des distances au carré.

Reste encore à mettre en pratique ce principe de mesure. Pour établir l'égalisation des éclairagements, il est nécessaire d'utiliser une source auxiliaire déplaçable. Par exemple, une bougie. Celle-ci deviendra l'unité d'intensité lumineuse et le restera jusqu'en 1954, où la candela prendra sa place dans le système international des unités.

Cependant, mesurer l'intensité lumineuse du Soleil aux solstices d'hiver et d'été pose d'autres problèmes pratiques. Il faut attendre six mois entre les deux mesures et, surtout, la luminosité du Soleil est bien trop importante par rapport à celle des chandelles dont dispose le savant. Astucieusement, Bouguer considère la pleine Lune plutôt que le Soleil. À des hauteurs identiques, la lumière des deux astres traverse bien la même épaisseur d'atmosphère et diminue par conséquent de la même proportion.

UNE NUIT DE PLEINE LUNE

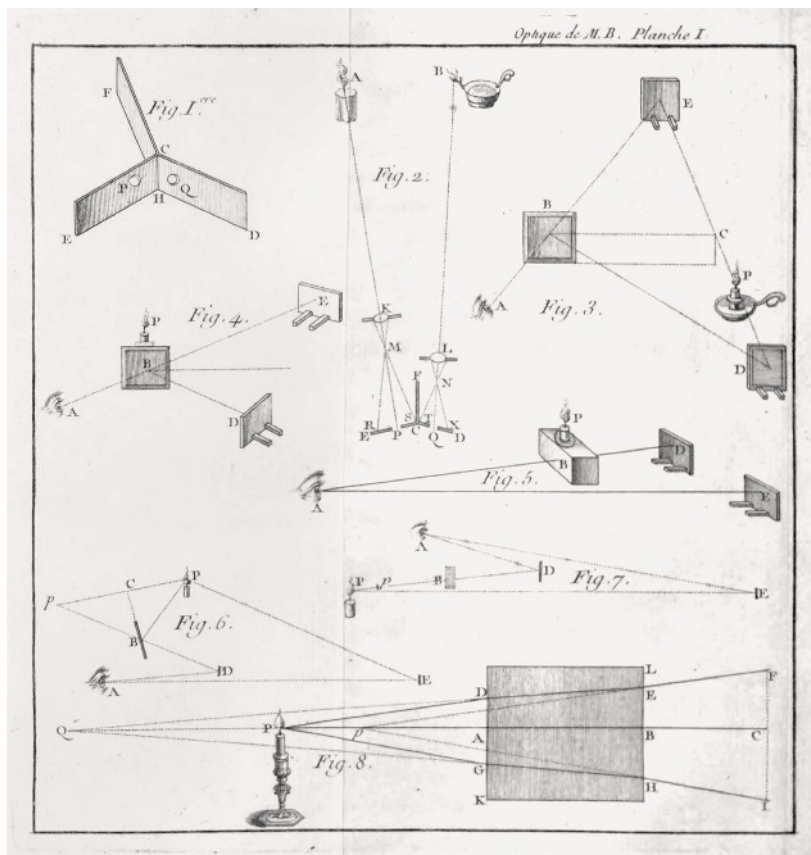
La mesure consiste à comparer la lumière de la pleine Lune à celle de quatre chandelles. L'opération a lieu lors de deux nuits consécutives : le 23 novembre 1725 vers 10 heures et demie du soir et la nuit suivante vers 3 heures du matin pour des hauteurs de pleine Lune correspondant à celles du Soleil aux solstices d'hiver et d'été au Croisic. Résultat : la première intensité lumineuse mesurée correspond à environ deux tiers de la seconde. Bouguer a donc réussi à quantifier la différence d'éclairage entre les solstices d'hiver et d'été, et a ainsi confirmé que cette différence suffit à expliquer, au moins en partie, pourquoi il fait plus froid en hiver. L'Académie, satisfaite, publie la présentation de ses résultats en 1726.

Dans la préface de son *Essai*, Bouguer envisage des pistes d'applications pour sa méthode. Étonnamment, il met l'accent sur une idée en lien avec la peinture, plus précisément avec la perspective aérienne, « cette gradation des teintes et demi-teintes, qui est cause que les parties d'un tableau semblent fuir ou avancer ».

L'OMBRE DE LÉONARD

Cette idée fait écho à la pratique des peintres de la Renaissance, et en particulier de Léonard de Vinci. À cette époque, la perspective et la peinture à l'huile ont permis de traduire les volumes et les reliefs avec un réalisme rarement atteint jusqu'alors. Vinci a bénéficié de cette révolution technique et a porté la maîtrise de la construction des ombres et des lumières jusqu'à l'incarner. Il n'est donc pas surprenant de trouver, dans un de ses fameux codex, quelques schémas rudimentaires décrivant le principe de comparaison des ombres créées par deux sources (voir la figure page 76).

Bouguer connaissait-il ses travaux ? Peu probable. En revanche, peut-être avait-il lu des ouvrages se référant au traité d'optique qu'un savant jésuite d'Anvers, François d'Aguilon, a publié en 1613 et dans lequel un autre peintre, Paul Rubens, semble illustrer le fonctionnement



Dans son *Traité d'optique*, publié de manière posthume en 1760, Pierre Bouguer présente divers systèmes de mesure photométrique. Il y critique également des dispositifs antérieurs aux siens, dont la mesure dépend de la vue de l'opérateur.