

LA SCINTILLATION DES ÉTOILES

1. À L'ŒIL NU, ASPECTS HISTORIQUES ET PHYSIQUES

Alexis Merlaud et Romain Maggiolo
Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique

La scintillation des étoiles a fait couler beaucoup d'encre et diverses théories ont été avancées au cours des siècles pour expliquer ce phénomène que n'importe quel promeneur nocturne peut constater. Dans cet article nous présentons quelques-unes de ces théories, depuis l'Antiquité grecque jusqu'à nos jours, en essayant d'attribuer correctement les apports des différents auteurs à la compréhension actuelle. La vulgarisation de cette dernière nécessite d'introduire quelques concepts d'optique: si le problème était trivial, Aristote, Galilée et Newton n'auraient pas avancé chacun une théorie différente. Néanmoins cet article vise un public large et insiste sur l'histoire des idées plutôt que sur les détails physiques.

Il n'est pas nécessaire de connaître les constellations pour distinguer, dans le ciel nocturne, une étoile d'une planète. Spica et Saturne sont par exemple proches en Juillet 2011 et visibles en début de nuit au-dessus de l'horizon Sud-Ouest. L'éclat des deux astres est sensiblement similaire mais l'étoile Spica scintille contraire-

ment à la planète Saturne. Cette absence de scintillation s'applique largement aux autres planètes visibles à l'œil nu. La scintillation des étoiles se manifeste par des variations rapides d'intensité et pour les plus brillantes d'entre elles, comme Sirius, on distingue aussi des changements de couleur. L'étymologie grecque de planète, *astre errant*, souligne la seconde différence avec les étoiles du point de vue d'un observateur. Contrairement à ces dernières qui apparaissent immobiles sur une sphère céleste, elle-même en rotation autour de la Terre, les planètes changent de position par rapport aux constellations. Sans connaissance de la nature des astres, c'est la conjonction de ces deux phénomènes, absence de scintillation et mouvement erratique, que les premiers astronomes devaient expliquer en plus de la scintillation elle-même. L'astronomie étant la plus ancienne des sciences, la scintillation des étoiles et son absence pour les planètes est sans doute l'une des observations les plus anciennes de l'homme sur la Nature.

La plus ancienne interprétation rationnelle ayant survécu apparaît dans le traité *Du Ciel* d'Aristote au IV^e siècle avant notre ère. A cette époque, la vision est considérée par certains savants dont Platon comme un processus actif, proche du toucher : un *rayon visuel* est envoyé de l'œil jusqu'à l'objet. Aristote s'oppose à cette théorie dans plusieurs de ses ouvrages, en remarquant par exemple qu'elle ne peut pas expliquer pourquoi il est difficile

de voir dans l'obscurité. Mais paradoxalement, il utilise le concept du *rayon visuel* pour expliquer deux phénomènes : l'arc-en-ciel et la scintillation des étoiles. Dans le deuxième cas, la grande distance entre les étoiles et l'observateur est invoquée, celle-ci serait telle que « *notre vue, en se portant loin, vacille et tourbillonne à cause de sa faiblesse* », au contraire, « *les planètes sont voisines de nous, et notre vue a dès lors la force suffisante pour arriver jusqu'à elles* »(1).

L'influence des idées d'Aristote, et ce dans tous les domaines, a été considérable en Occident et dans le monde musulman. Les philosophes arabes ont cependant développé plus tôt que leurs homologues européens une méthode d'appréhension de la Nature différente de l'exégèse des textes anciens qui se résume ainsi: l'expérience est seule juge. Ainsi un des pionniers de l'optique et de la démarche scientifique en général est Alhazen (Fig. 1), un savant du X^e siècle originaire de Bassorah dans l'actuel Irak. Celui-ci réfute la théorie du rayon visuel, étudie la réflexion et la réfraction et démontre entre autres la propagation rectiligne de la lumière. Il semble être le premier à avoir eu l'idée d'expliquer la scintillation des étoiles par des changements de réfraction dans l'atmosphère (2). Cette théorie est reprise près de deux siècles plus tard par un successeur andalou d'Alhazen, Averroes, dans ses commentaires de l'œuvre d'Aristote. Des changements de réfraction peuvent modifier la direction de propa-



Fig.1 Alhazen (965 - 1040)

C'était dans *Ciel et Terre* il y a 125 ans ...

A mesure qu'on comprend le rôle des différents paramètres d'un phénomène physique, on peut se servir de cette connaissance pour faire des prédictions. Dans la deuxième moitié du XIX^e siècle, le rôle prépondérant de l'état de l'atmosphère dans la scintillation des étoiles était acquis et les avancées technologiques permettaient de construire des instruments capables de quantifier les variations d'intensité et de couleurs.

Montigny (1819-1890) a ainsi développé des scintillomètres et réalisé un nombre considérable d'observations. Ce proche de Quételet et membre de l'Académie fut collaborateur de l'observatoire et a étudié en détail les relations entre les conditions climatiques et l'intensité de la scintillation. Il n'acceptait pas la théorie des interférences pour expliquer ce phénomène et penchait plutôt pour des phénomènes de dispersion(7). Dans le numéro 6 de *Ciel et Terre* (8), il montre des corrélations entre la température de l'air, la présence d'eau sous diverses formes dans l'atmosphère et la scintillation des étoiles. Il conclut son article avec l'espoir que la scintillation pourra servir à prévoir le temps. Ceci ne se réalise pas vraiment mais son travail est amplement cité dans la littérature scientifique, entre autres par les prix Nobel Rayleigh et Chandrasekhar, et a permis à la compréhension du phénomène de progresser...

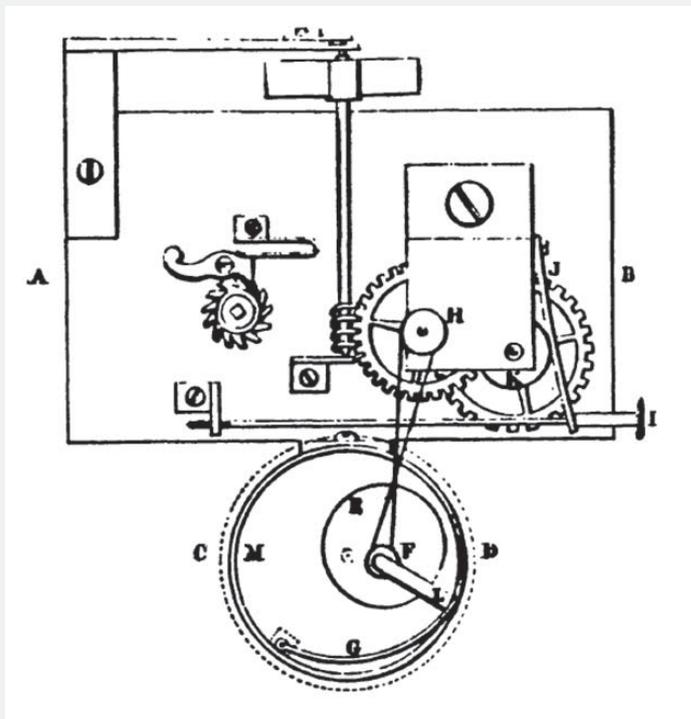


Fig 6. Un des scintillomètres construit par Montigny

gation de la lumière, c'est ce qui explique aussi les mirages. Bien qu'ils interviennent dans la compréhension actuelle, ils ne sont qu'une partie de l'explication et n'expliquent pas le fait que seules les étoiles scintillent.

Les conceptions optiques des ara-

bes ont été transmises et défendues par Roger Bacon (3) et Witelo (5) au XIII^e siècle, même si ces deux auteurs y associent, concernant la scintillation des étoiles, les explications d'Aristote. Curieusement, cependant, l'hypothèse de la réfraction est négligée au profit d'explications qui paraissent

aujourd'hui plus fantaisistes par ceux-là mêmes qui œuvrent à la révolution copernicienne. Tycho Brahe explique ainsi la scintillation en imaginant que les étoiles sont couvertes de facettes et sont en rotation sur elles-mêmes, telles des boules réfléchissantes de discothèque. D'après lui, les



Fig. 2 Arago (1786-1853)

planètes ne tournent pas et par conséquent ne scintillent pas non plus. Dans une lettre à Kepler du 26 mars 1611, Galilée exprime son point de vue sur la question : « *J'estime que nous philosopherons convenablement en attribuant la scintillation des étoiles à la vibration qu'elles impriment à leur lumière propre, c'est-à-dire à une lumière qui naît dans leur substance intime alors qu'à la surface des planètes la lumière du Soleil s'arrête et est réfléchi* »(4). La prémisse du Toscan est juste et il est le premier à la formuler: les planètes ne produisent pas leur propre lumière, contrairement aux étoiles. Mais sa conclusion est fautive, les planètes, comme on le verra, peuvent scintiller dans certaines conditions. Quant à Kepler, il a

avancé plusieurs théories, y compris celle de Brahé et de Galilée. Il mentionne un possible effet de l'atmosphère mais sans s'y attarder. Pour Descartes, qui connaissait pourtant assez bien la réfraction, la scintillation s'explique par la présence de tourbillons entourant les étoiles. Nous ne nous attarderons pas ici sur les tourbillons de Descartes mais comme nous allons le voir, son explication est plus proche de notre conception actuelle que celle de Galilée. En fait ce sont les anglais Hooke et Newton qui reprennent l'idée de la réfraction de l'atmosphère dans la seconde moitié du XVII^e siècle. Le premier imagine que des irrégularités dans la distribution de température engendrent dans l'atmosphère des lentilles d'air convexes ou concaves, qui respectivement dilateraient ou réduiraient la taille de l'image d'une étoile. Cette idée est raisonnable mais on sait aujourd'hui que ces irrégularités sont trop étendues pour avoir un effet notable sur une ouverture de la taille d'un œil. Newton, évoquant l'origine atmosphérique de la scintillation des étoiles dans son *Optique*, propose de placer les télescopes au sommet des hautes montagnes où règne un « *air calme et serein [...] au dessus des vapeurs grossières* ».

Un trait commun à toutes les

explications précédemment décrites est la conception corpusculaire de la lumière, explicitée par Newton. Celle-ci suit des rayons, dont Alhazen a montré qu'ils sont rectilignes et qui sont déviés par la réfraction et la réflexion. Or en 1801, Thomas Young bouleverse la conception traditionnelle dans une des expériences les plus importantes de l'histoire de la physique, les fentes d'Young (Fig. 3). Celle-ci consiste à éclairer un écran par l'intermédiaire de deux trous percés dans une plaque obscure. Le résultat est étonnant : sur l'écran on peut voir des alternances de franges claires et obscures. Ceci s'interprète néanmoins facilement si on considère, comme Huygens l'avait supposé, que la lumière a un comportement ondulatoire et est soumise aux phénomènes d'interférences, comme les vagues à la surface d'un plan d'eau. Dans cette théorie la couleur correspond à la longueur d'onde de la lumière. Cette découverte est fondamentale pour l'explication actuelle du phénomène qui nous intéresse mais Young lui-même ne s'en est pas rendu compte puisqu'il évoque la scintillation en avouant ne pas vraiment la comprendre.

Peu après l'expérience de Young et grâce à sa connaissance de celle-ci, l'astronome français François

Références

1. Aristote, Livre II, CHAPITRE VIII., *Traité du Ciel*, 350 B.C.E
2. Draper J. W, *History of the intellectual development of Europe* (Harper, 1865).
3. Roger Bacon, *Opus Majus*, Part V, CHAPTER VII, 1267
4. Palmieri P., *Galileo and the Discovery of the Phases of Venus*, *Journal for the History of Astronomy* 32, no. 2 (2001): 109–129.
5. Arago, *De la scintillation*, *Memoire a l'institut*, 1840
6. Montigny, *La scintillations des étoiles dans ses rapports avec les phénomènes météorologiques*, *Ciel et Terre*, 6, 1885
7. Montigny, *Memoires de l'Académie de Bruxelles*, *La cause de la scintillation ne dériverait-elle point de phénomènes de réfraction et de dispersion ?*, 28, 1856
8. Fried David L., *Anisoplanatism in adaptive optics*, *Journal of the Optical Society of America* 72, no. 1 (January 1, 1982): 52.
9. Loyd et al. *The Potential of Differential Astrometric Interferometry from the High*

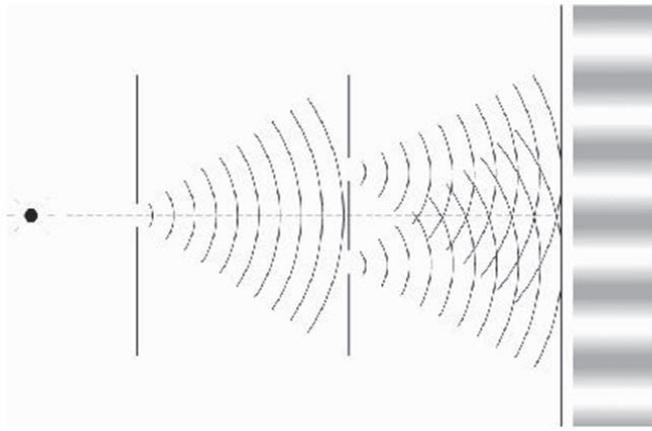


Fig 3. Expérience des fentes de Young

Arago (Fig. 2) envoie une lettre à son ami l'explorateur scientifique allemand Alexandre Von Humboldt qui est publiée dans l'ouvrage de ce dernier, *Voyage aux régions équinoxiales du nouveau continent*, en 1814. Il utilise dans son message la conception ondulatoire de la lumière pour expliquer la scintillation des étoiles : des phénomènes d'interférences peuvent expliquer aussi bien la variation rapide d'intensité que les changements de couleurs. Dans un mémoire présenté à l'Institut de France en 1840 (5), il décrit d'abord la genèse de ses idées : en regardant l'image d'une étoile dans un télescope (Fig. 4), on aperçoit parfois un disque central lumineux, entouré de cercles concentriques : cette *figure de diffraction* ressemble beaucoup aux interférences de Young. En faisant varier la position de l'oculaire, l'image de l'étoile est moins nette mais les cercles concentriques se déplacent et le disque lumineux du centre devient obscur. La position de l'oculaire définit le chemin optique à l'intérieur du télescope, ce qui modifie à son tour la position des zones d'interférences. A l'œil nu, ce qui modifie le chemin optique ce sont les irrégularités de réfraction dans les couches de l'atmosphère, elle-même en mouvement sous l'effet des vents. Dans le même texte, Arago réfute une à une les expli-

cations avancées antérieurement par plus de trente auteurs depuis Aristote, que nous n'avons pas pu toutes reprendre ici. Reste la question de l'absence de scintillation des planètes. Arago y répond en remarquant que l'angle sous lequel on voit une planète (son *diamètre apparent*) est beaucoup plus grand que celui de n'importe quelle étoile, comme on peut le voir facilement avec une petite lunette. Dans ces conditions les irrégularités rencontrées par le *front d'onde* (équivalent pour les ondes lumineuses du terme de vague) d'une planète sont justement trop « irrégulières », c'est-à-dire trop nombreuses et avec des effets différents. En conséquence l'effet de ces irrégularités s'annule et la scintillation n'apparaît pas.

A la suite d'Arago qui dans son mémoire de 1840 proposait plusieurs concepts d'instrument de mesures de la scintillation (*scintillomètres*), la quantification systématique de ce phénomène est effectuée par plusieurs expérimentateurs, dont le belge Montigny dans l'espoir de prévoir les conditions météorologiques (cf. encadré). Ce dernier, comme d'autres et en particulier Lord Rayleigh, n'accepte pas l'explication d'Arago. Mais au cours du XX^e siècle les progrès théoriques dans la modélisation des turbulences atmosphériques per-

mettent de pousser plus avant la compréhension de ses effets sur la lumière et les phénomènes d'interférences apparaissent de plus en plus comme l'origine de la scintillation dans le cas de la vision à l'œil nu.

Il manquait cependant à Arago un concept important pour expliquer pourquoi les planètes ne scintillent pas avec plus de rigueur, celui de la *cohérence spatiale*. Young ne comprenait pas lui-même cette notion qui a commencé à être introduite par Fresnel, pourtant elle est nécessaire à l'apparition des interférences responsable de la scintillation. La cohérence spatiale signifie qu'en deux points le front d'onde doit être corrélé, c'est-à-dire que la *différence de phase* (différence de position par rapport à la crête de la vague) est constante au cours du temps. Ceci est le cas pour une source ponctuelle, et dans la figure 3, la cohérence spatiale est réalisée par le premier écran percé d'un trou qui sélectionne une petite partie de la lumière émise par la source qui peut être étendue comme la flamme d'une bougie. Les lasers sont cohérents spatialement mais dans la nature il y a très peu de sources de cette sorte, à part certaines étoiles très particulières, les pulsars. La cohérence spatiale se crée pendant le trajet de la lumière dans l'es-



Fig. 4. Figure de diffraction dans un télescope

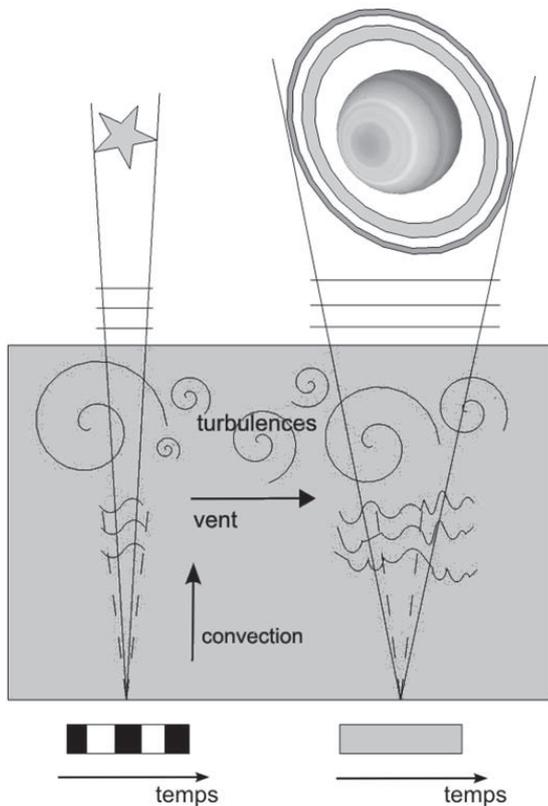


Fig 5. La scintillation des étoiles telle qu'on la comprend aujourd'hui: un phénomène d'interférences

pace jusqu'à nous. Ce résultat a été démontré indépendamment par deux physiciens hollandais, Van Cittert et Zernike dans les années 30. La démonstration en est assez technique mais il n'est pas nécessaire de la comprendre en détail pour appréhender le résultat : la cohérence spatiale est le résultat d'une source ponctuelle.

forme des fronts d'ondes, aussi bien de l'étoile que de la planète. Mais il y a un certain angle, l'angle d'isoplanatisme(8), qui dépend de l'état de l'atmosphère, sous lequel les points d'un front d'onde restent corrélés et la lumière cohérente. Dans le cas des étoiles leur diamètre apparent est inférieur à cet angle, dans le cas des planètes

Les étoiles ou les planètes sont des sources étendues mais vues de loin elles apparaissent ponctuelles et la lumière des deux types d'astres est cohérente en arrivant au sommet de l'atmosphère. En rentrant dans l'atmosphère (Fig. 5) la forme des fronts d'ondes sera modifiée par des irrégularités d'indices de réfraction dues à des variations de la densité de l'air, qui elles-mêmes sont causées par des variations de sa température. A cause de la convection (mouvement vertical des masses d'air ayant des températures différentes) et des vents, les poches d'air tourbillonnent et modifient constamment la

c'est le contraire, ce qui entraîne respectivement la présence et l'absence de scintillations. Dernière remarque : l'angle d'isoplanatisme diminue lorsque la turbulence de l'air augmente. A contrario si l'atmosphère est extrêmement calme, cet angle augmente et on peut imaginer qu'il dépasse le diamètre apparent des planètes si bien que celles-ci se mettent à scintiller. Il faut pour cela que la convection soit réduite au minimum. Comme celle-ci se produit parce que le sol est chauffé par le soleil pendant la journée, les meilleures conditions sont donc l'hiver en Antarctique, pendant la nuit polaire. Ainsi en 1995 et 1996, lors d'une campagne d'observations en Antarctique, Loyd (9) a eu la chance de voir Jupiter scintiller.

Conclusion

On peut attribuer la scintillation des étoiles à la source, au trajet ou à l'œil. En fait les trois sont impliqués, le diamètre apparent de la source doit être inférieur à un angle caractéristique de l'atmosphère, et la scintillation visible à l'œil nu n'est pas celle qu'on voit dans un télescope. Ceci sera l'objet de notre prochain article.

Brèves de l'espace

Herschel dénoue les filaments interstellaires

Le télescope spatial Herschel de l'Agence Spatiale Européenne ESA a livré aux astrophysiciens des images inédites de réseaux de filaments interstellaires, au sein desquels se formerait la majorité des étoiles. En recoupant ces observations avec des modèles théoriques, les chercheurs ont pu caractériser précisément ces filaments, une nouvelle avancée

pour comprendre où et comment naissent des étoiles.

Deux prédictions d'Einstein confirmées

Dans la théorie générale de la relativité, Einstein faisait deux prédictions : (1) un objet, par sa masse, déforme l'espace-temps autour de lui, c'est l'effet géodétique ; (2) en tournant sur lui-même, cet objet influe aussi sur l'espace-temps.

Pour tester ces deux prédictions,

la NASA a placé en orbite polaire, en 2004, une sonde, Gravity B. Dotée de 4 gyroscopes ultra-précis, elle a visé l'étoile IM Pegasi. Si l'espace-temps n'était pas modifié à proximité de la Terre, l'orientation des gyroscopes aurait dû rester immuable. Cela n'a pas été le cas, donnant raison à Einstein. La mesure des changements minuscules dans l'orientation des gyroscopes de la sonde, désactivée en 2010, a permis de distinguer l'influence des deux effets qu'il avait caractérisé.