

Le rayon vert



Au milieu du 19^e siècle, des voyageurs revenant d'expéditions lointaines, décrivaient un phénomène étrange dans lequel les derniers rayons du Soleil, au moment de son coucher, prenaient subitement une “brillante couleur émeraude”. Ces récits tombèrent dans l'oubli, jusqu'à ce que Jules Verne décide de faire du “Rayon Vert” le ressort principal d'un roman publié en 1882. Parmi les nombreux lecteurs passionnés par ce phénomène mystérieux, se trouvaient des physiciens, qui commencèrent à mener leur enquête.

Alors, mythe, illusion d'optique ou phénomène physique ? La question est aujourd'hui pratiquement résolue.

Depuis que l'on photographie ce phénomène, on sait qu'il ne s'agit ni d'une légende, ni d'une illusion d'optique, ni d'une image rémanente du soleil couchant. **Le rayon vert est le résultat d'une rencontre entre plusieurs phénomènes optiques qui se produisent dans l'atmosphère.** C'est pourquoi il est plutôt rare à observer.

À vrai dire, le terme **rayon vert** n'est pas tout à fait juste, on devrait parler plutôt de **lueur verte**. Pour la découvrir, il faut observer le Soleil lorsqu'il se couche, et, qu'à ses derniers instants, peu de temps avant sa disparition sur l'horizon, le dernier éclat qu'on en aperçoit est une mince lueur de couleur verte (lire l'encadré “Conditions d'observation”).

Une illustration du roman de Jules Verne.



Pas d'atmosphère, pas de rayon vert

Comment une lumière d'un vert franc peut-elle provenir d'un astre qui nous apparaît quotidiennement blanc-jaune, orange ou encore rouge à son coucher ? Avant de lister tous les mécanismes qui participent à ce spectacle, **il nous faut préciser qu'il s'agit avant tout d'une interaction entre la lumière du Soleil et notre atmosphère**. Si notre Terre était dépourvue d'atmosphère, alors comme sur la Lune, le ciel nous apparaîtrait noir avec un Soleil d'un blanc pur à son lever comme à son coucher (c'est ce qu'ont vu les astronautes des missions Apollo) : le rayon vert n'y existerait pas.



© AKG Images

Réfraction et trajectoire des rayons lumineux

Dans un milieu :

- **transparent** (gazeux, liquide ou solide)
 - **homogène** (la température, la pression, la densité... sont les mêmes en tout point du milieu)
 - et **isotrope** (ses caractéristiques sont les mêmes dans toutes les directions particulièrement son **indice de réfraction n**)
- ... la lumière se déplace **en ligne droite** et à **vitesse constante**, cette vitesse étant inférieure à 300 000 km/s. **C'est une loi de base en optique**, illustrée par la trajectoire de ces rayons laser sur la photo ci-dessous.

© Philippe Plailly/Eurelios/LookaSciences



Conditions d'observation

Cette lueur n'apparaît pas n'importe où, le phénomène est rare. Il faut que certains facteurs météo et géographiques soient réunis, en particulier :

- **une atmosphère très transparente** avec des vents très faibles ou nuls pour ne pas provoquer de turbulences atmosphériques (la circulation de l'air dans les différentes couches de l'atmosphère doit être laminaire, c'est-à-dire non perturbée).
- **un horizon lointain** : c'est surtout en mer ou en bord de mer que le rayon vert est le plus facilement observable car les rayons parcourent une distance très importante d'atmosphère pour atteindre l'observateur.
- **la présence de couches d'air** chaud et froid propices à l'apparition de mirages.
- **la position de l'observateur** par rapport à l'horizon est à considérer. En effet, surélevé par rapport à l'horizon, l'œil aura alors plus de chances de distinguer nettement les derniers moments du passage du Soleil sous l'horizon.
- **être en altitude** permet de bénéficier d'une atmosphère souvent pure, d'autant plus que l'on est loin des villes !
- Enfin, le rayon vert est un phénomène furtif : il peut durer d'une fraction de seconde à quelques secondes. **Il faut donc être, en même temps, patient et vigilant !**

Attention, danger !

On peut avoir envie de surmonter les difficultés d'observation en utilisant des instruments grossissants tels que jumelles, longue-vue, télescope... Ceci est à éviter absolument pour des questions de sécurité : la rétine de votre œil risquerait d'être brûlée de façon irréversible, le principe de ces instruments étant de concentrer la lumière. Prudence !



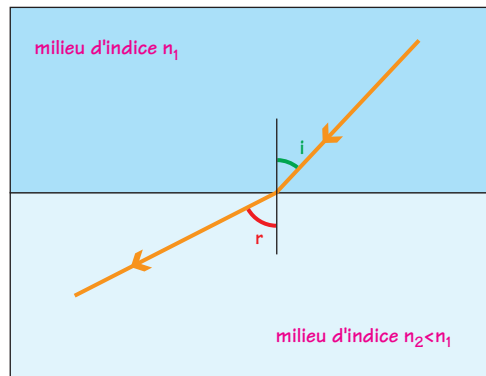
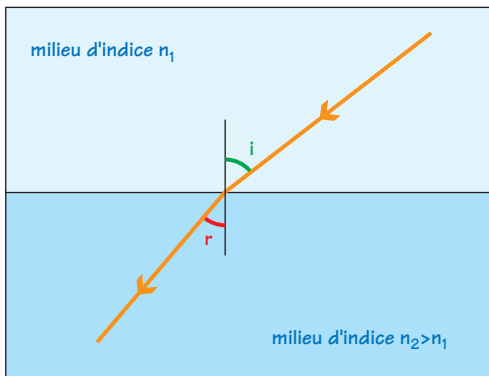


Fig. 1. Pour en savoir plus sur la réfraction des rayons lumineux, voir l'article "Mirages et autres phénomènes optiques" dans le Cosinus n°126.

Quand la lumière passe d'un tel milieu à un autre (différent mais toujours homogène et isotrope) elle est déviée. C'est le phénomène de la **réfraction**. Il est décrit par la loi de Snell-Descartes qui permet de montrer le lien entre les **angles d'incidences i** , de **réfraction r** et de **l'indice de réfraction n** du milieu. La déviation est la différence entre les angles i et r .

En pratique, un rayon provenant du Soleil qui arrive dans l'atmosphère est lui aussi dévié. Cette déviation reste faible lorsque les rayons sont peu inclinés (i sur le schéma). Par exemple, lorsque le Soleil est à 45° au-dessus de l'horizon, la déviation vaut $0,02^\circ$. Et même en supposant que $i = 90^\circ$, la déviation ne vaut que $1,3^\circ$!

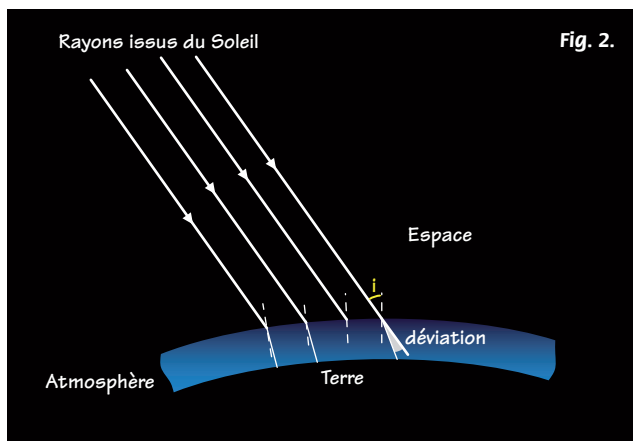


Fig. 2.

Mais **l'atmosphère n'est pas un milieu homogène** : sa pression, et donc sa densité, ainsi que sa température ne sont pas les mêmes par tout, **l'indice n de l'air varie** suivant des lois physiques (cf. Cosinus n° 126). En conséquence, la lumière change de direction lorsqu'elle passe d'une couche à une autre et, globalement, finit par se courber : c'est la **réfraction atmosphérique**.

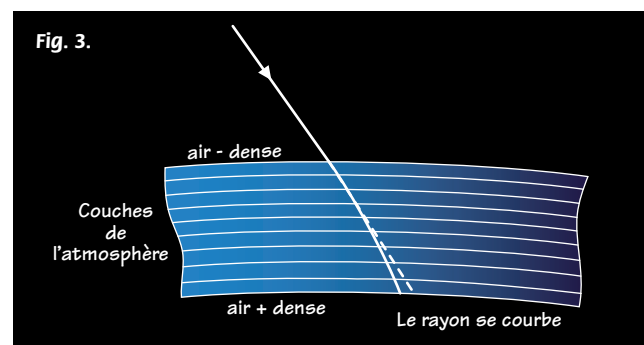


Fig. 3.

La lumière est donc courbée dans l'atmosphère hétérogène et cette courbure est d'autant plus grande que l'épaisseur d'atmosphère à traverser par la lumière est grande. Or, au coucher (ou au lever) du Soleil, l'épaisseur d'air traversée par la lumière est environ 50 fois plus grande qu'à son zénith, ce qui accentue le phénomène de réfraction (augmentation de la déviation **D**). Sur la **figure 4**, un observateur situé au point **A** verra le Soleil dans une direction apparente due à la courbure des rayons, alors que ce dernier est situé sous l'horizon.

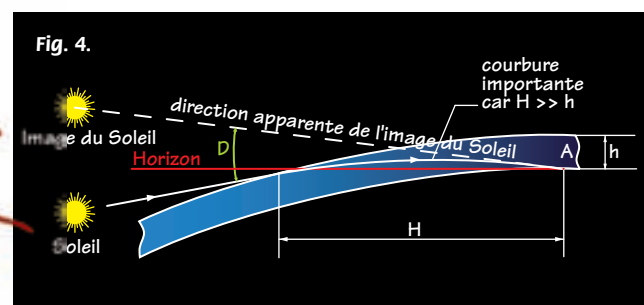


Fig. 4.



La décomposition de la lumière blanche

La décomposition de la lumière est un phénomène connu et facile à mettre en évidence à l'aide d'un prisme : c'est l'expérience de Newton. Lorsque la lumière du Soleil (lumière blanche) traverse le prisme, elle en ressort colorée. En regardant de plus près, on s'aperçoit qu'elle présente les couleurs de l'arc-en-ciel, du violet au rouge. Cela s'explique par le fait que la lumière blanche est en réalité un mélange de lumières de toutes les couleurs. Le prisme dévie différemment ces différentes couleurs.

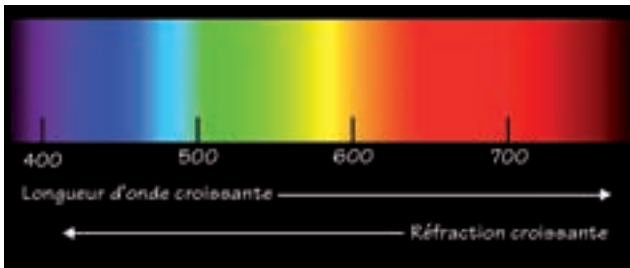


Fig. 5.

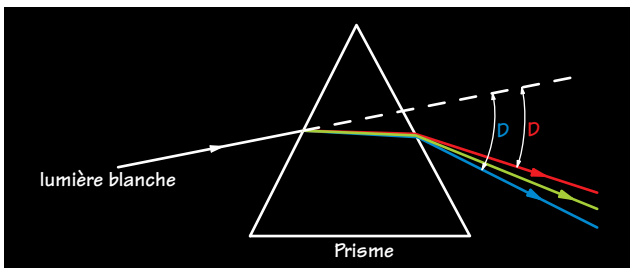


Fig. 6.

Le rayon vert lunaire

Le rayon vert peut aussi s'appliquer à un coucher (ou lever) de Lune. En effet, la Lune est éclairée par le Soleil, et en raison de la nature de sa surface, elle renvoie les rayons du Soleil vers la Terre. La Lune nous apparaît donc blanche, signe que toutes les couleurs du spectre lumineux sont mélangées. Donc, lorsque la Lune se couche, elle se comporte comme le Soleil lorsqu'elle est près de l'horizon, elle est elle aussi surmontée d'une lueur verte dans ces derniers instants.



* Ou en simplifiant : les rayons violets étant plus courbés que les rayons rouges, l'image apparente violette est plus haute que l'image apparente rouge.



Plus précisément, chaque couleur, du violet au rouge, correspond à une onde électromagnétique de longueur d'onde croissante. **Et la réfraction par le prisme est d'autant plus forte que la longueur d'onde est plus petite** : dans le domaine du visible, les rayons les plus déviés sont vers l'extrémité bleue-violette de l'arc-en-ciel, les moins déviés sont les rayons rouges : c'est la **réfraction différentielle**.

Or l'atmosphère agit à la manière d'un prisme sur la lumière du Soleil qu'elle décompose en une gamme de couleurs. Ainsi, non seulement la réfraction atmosphérique élève l'image du Soleil couchant par rapport à sa position réelle, mais elle provoque aussi un **décalage vertical de ses différentes couleurs en fonction de leur longueur d'onde**.

On comprend grâce aux figures 7 et 8 que l'observateur situé au point **A**, verra les rayons rouges du Soleil disparaître sous l'horizon en premier, suivis dans l'ordre de l'arc-en-ciel des rayons jaunes, verts, bleus et finalement violets. **(Les rayons de courte longueur d'onde étant plus courbés que ceux de grande longueur d'onde, leur image apparente dans le ciel est plus haute.)***

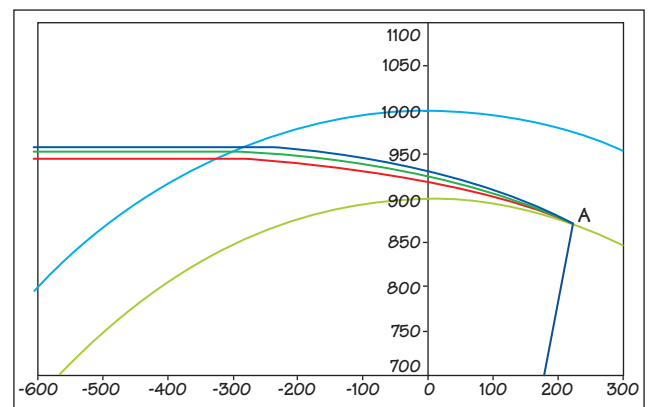
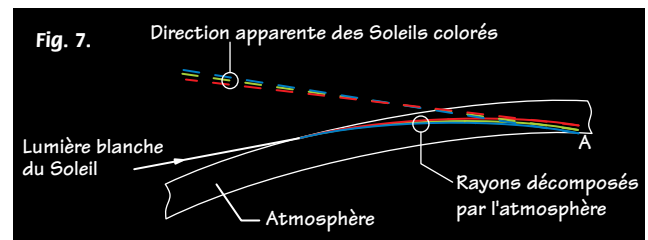


Fig. 8.

Le bleu est diffusé en cours de route

Le phénomène que nous étudions concerne une lueur verte : que se passe-t-il pour les longueurs d'ondes plus courtes, c'est-à-dire le bleu et le violet ? Un autre mécanisme entre en jeu : c'est la propriété qu'ont les particules de l'atmosphère (oxygène et azote principalement) d'absorber la lumière pour ensuite la réémettre dans des directions aléatoires. Les petites longueurs d'ondes du rayonnement visible (bleu) étant beaucoup plus sensibles à ce phénomène de **diffusion de Rayleigh** que les grandes longueurs d'onde (rouge), c'est la raison pour laquelle le ciel prend une couleur bleue dans toutes les directions, pendant la journée.

Fig. 10.

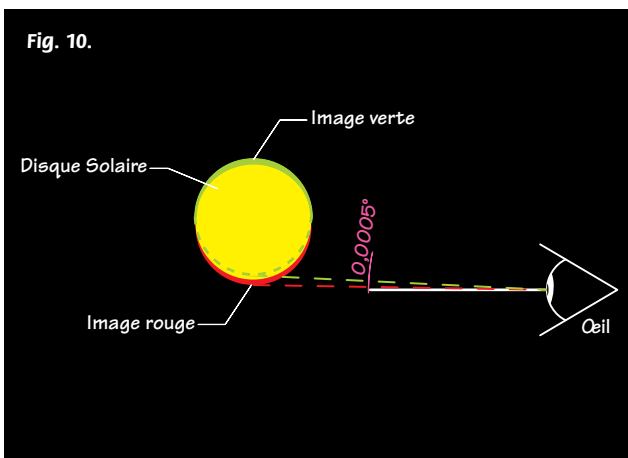
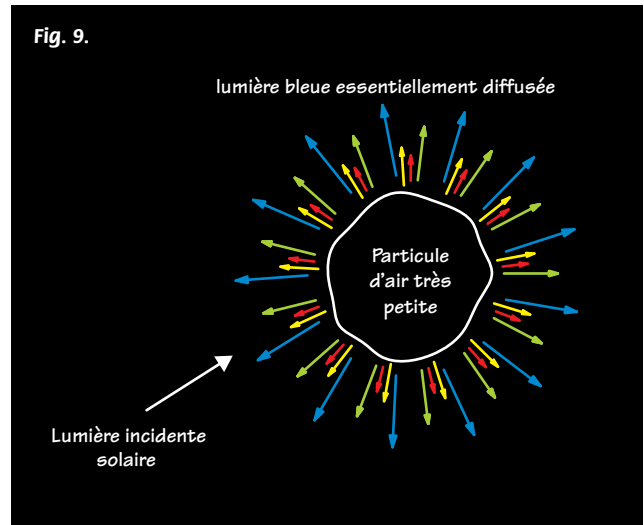


Fig. 9.



Mais à l'endroit où le Soleil se couche, près de l'horizon, l'épaisseur d'atmosphère que traverse sa lumière devient très importante. **La lumière bleue-violette va donc pratiquement disparaître à proximité du Soleil**, où se trouvent plutôt les rayons qui ont subi le moins de diffusion.

Au final, un observateur pourrait théoriquement observer autour du disque solaire un léger bord rouge sous le disque, et un bord vert supérieur (le bleu et le violet ayant disparu, cf. ci-dessus). **Seulement, l'angle qui sépare ces décalages est très faible : environ $0,0005^\circ$, ce que l'œil humain ne peut distinguer.**

Le rayon bleu existe-t-il ?

Malgré la diffusion de la lumière bleue par l'atmosphère, le rayon bleu existe... dans des conditions vraiment exceptionnelles. Si l'atmosphère est très pure, et la situation de l'observateur idéale, une partie des rayons bleus de la lumière solaire échappe à la diffusion complète et finit quand même par arriver jusqu'à l'œil. On peut alors voir, après la lueur verte, une lueur bleue. Mais cette observation reste rarissime et plutôt réservée à des photographes expérimentés (photo ci-contre prise au Mont Paranal au Chili à l'aide d'une lunette astronomique couplée à une caméra CCD).



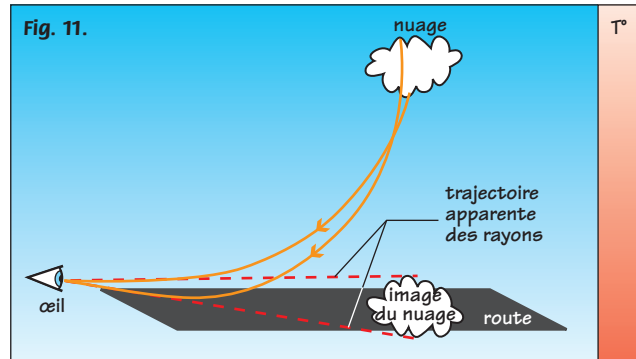
© G. Blanchard/ESO

Un mirage comme amplificateur

Quelque chose doit amplifier le phénomène pour qu'il devienne visible à l'œil nu. Bien sûr, plus le Soleil plonge à l'horizon, plus la réfraction atmosphérique courbe les rayons lumineux et décale les couleurs du disque solaire. Mais ce n'est pas suffisant. Il faut qu'un **mirage** agisse comme une lentille grossissant la mince région verte de l'image apparente du Soleil.

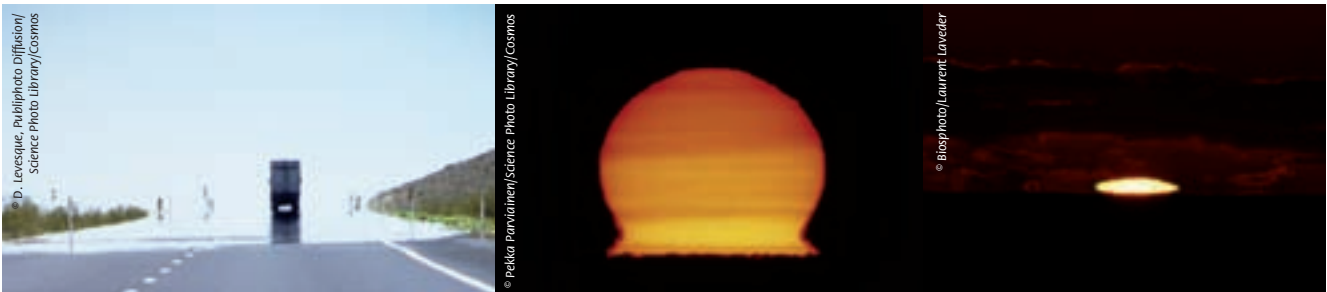
Dans la plupart des cas (entre 2/3 et 3/4 des observations), le mirage qui intervient est un **mirage inférieur**. Nous avons décrit en détail son mécanisme dans l'article "Mirages et autres phénomènes optiques" du Cosinus n°126, résumons-le ici. Une couche d'air chaud située au niveau du sol est surmontée d'air froid en altitude : la densité de l'air, et donc son indice de réfraction **n**, **augmentent avec l'altitude**.

Les rayons issus du nuage (**figure 11**) subissent une courbure orientée comme indiqué et finissent par être confondus avec les rayons issus de la route. L'image du nuage est alors vue **à l'envers au niveau du sol**, c'est ce qui explique que l'on prend pour une flaque d'eau ce qui est en réalité l'image du ciel (voir la photo de gauche ci-dessous).



Appliqué au Soleil, le principe du mirage inférieur donne une image inversée du Soleil située juste au-dessous de lui. Au fur et à mesure que son disque plonge sous l'horizon, l'image inversée suit son mouvement. **On voit aisément ce qui se produit au dernier moment : le dernier arc bordé de vert est couplé à son image inversée**, il apparaît une ellipse dont les bords sont d'un vert franc, et le cœur légèrement plus jaune.

D'autres types de mirages provoquent des rayons verts plus longs et brillants, par une alternance complexe de couches d'air chauds et froids observés à une altitude adéquate. Nous ne les détaillerons pas ici.



Le principe du mirage inférieur appliqué au Soleil.

L'œil rajoute une touche de vert

Une dernière partie du phénomène se situe... **à l'intérieur de l'œil humain**. En effet, les observateurs du rayon vert peuvent constater que la couleur rendue par leurs photos est moins franche que celle provenant de la vision directe du phénomène.

Lorsque l'œil reçoit pendant quelques secondes l'image du Soleil couchant, les photopigments de la rétine qui sont sensibles au rouge (courbe rouge sur la **figure 12**), sont saturés, ils perdent momentanément en sensibilité : la perception globale des couleurs par l'œil est légèrement décalée vers les tons verts et bleus. Ainsi, des rayons lumineux proches du jaune seront perçus comme verts, **ce qui magnifiera l'impression visuelle du rayon vert**.

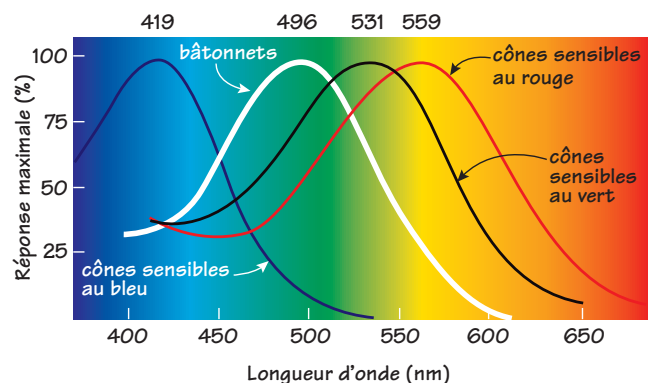


Fig. 12. Sensibilité (en %) à la lumière des 4 photorécepteurs de la rétine, en fonction de la longueur d'onde.

Martin Fresse