

ÉPREUVE DE TIPE - PARTIE D (A.S.D.S).
ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOSSIER SCIENTIFIQUE.

TITRE : À LA POURSUITE DU RAYON VERT.

***SOURCE : Dossier construit à partir d'un article de Science et Avenir
(Hors Série, avril 1995).***

Temps de préparation : 2 H 15 en loge (sans documents extérieurs).

Temps de présentation devant le jury : 10 minutes.

Entretien avec le jury (questionnement): 10 minutes.

GUIDE POUR LE CANDIDAT :

Le dossier ci-joint comporte :

Document principal : 8 pages.

Documents annexes : aucun.

TRAVAIL SUGGÉRÉ AU CANDIDAT :

***Le candidat cherchera à analyser les conditions d'observation du
« rayon vert » et les raisons de son apparition, en s'appuyant sur les ex-
plications du dossier et ses connaissances personnelles.***

CONSEILS GÉNÉRAUX POUR LA PRÉPARATION DE L'ÉPREUVE :

Ce dossier est long. Lisez-le dans un temps raisonnable (< 1 heure 30).

Réservez du temps pour préparer l'exposé devant le jury. Le Candidat a la possibilité de préparer un ou plusieurs transparents pour mettre en valeur ses arguments.

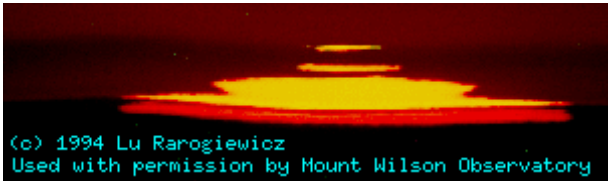
À la poursuite du rayon vert.

Durant toute l'histoire de l'humanité le soleil a fasciné les esprits. Du dieu Râ chez les Egyptiens au Roi Soleil Louis XIV plus près de nous, il a d'abord été assimilé à une figure divine par l'impression visuelle qu'il dégageait. Mais depuis deux siècles, du statut d'objet divin il est passé à celui d'objet d'études scientifiques du fait de ses nombreuses influences ; il est ainsi étudié dans des domaines très variés parmi lesquels la météorologie, la biologie, l'astronomie ou la physique nucléaire.

De tous les phénomènes lumineux solaires que vous avez pu contempler, il en est un plus rare et encore plus beau. A l'instant précis où le soleil disparaît sous l'horizon, une étrange lueur verte surgit parfois. Illusion d'optique ou, comme l'a écrit Jules Verne, simple parabole de la découverte amoureuse ? On a longtemps hésité jusqu'aux premières photographies, prises récemment. Le spectacle est aussi saisissant que furtif...

I. La diversité des couchers de Soleil – Les rayons verts

1. Observation du soleil couchant

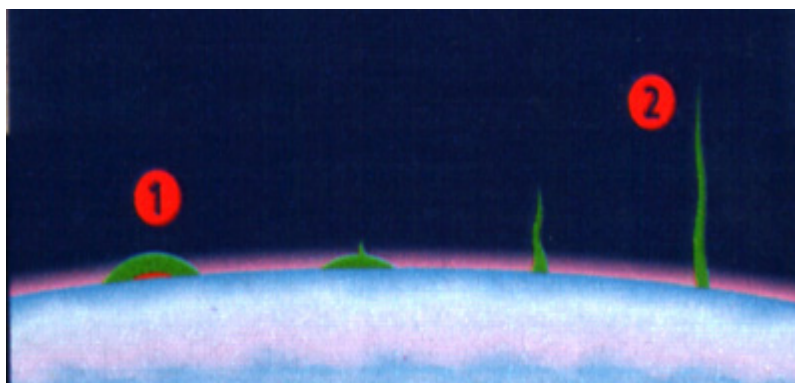
L'observation du soleil couchant réserve bien souvent un spectacle riche en couleurs aux observateurs. Non seulement le ciel est envahi par des couleurs souvent mélanges de rouge et de jaune, mais le Soleil lui-même présente parfois des couleurs inhabituelles. Il présente souvent une couleur parfaitement uniforme comme ci-dessous :	Mais parfois son aspect est différent : il peut montrer un «dégradé» de couleurs :
	
Plus rarement encore c'est sa forme apparente qui est modifiée :	Ou de façon encore plus spectaculaire :
	 (c) 1994 Lu Rarogiewicz Used with permission by Mount Wilson Observatory

Ces modifications de forme apparente sont la plupart du temps causées par des mirages. Mais les couchers de Soleil les plus beaux sont ceux au cours desquels apparaît le rayon vert.

2. Le béret vert - Le rayon vert

Le rayon vert fut pour la première fois décrit par James Prescott Joule dans une lettre à la Société Littéraire et Philosophique de Manchester, en 1869, et qui attira l'attention des scientifiques sur ce phénomène (cependant il semble que les marins l'avaient observé bien avant). Joule écrit : « [I noticed that] at the moment of the departure of the sun below the horizon, the last glimpse is coloured bluish green.[...] Just at upper edge, where bands of the sun's disk are separated one after the other by refraction, each band becomes coloured [...] just before it vanishes »*. Dès lors il y eut de nombreuses recherches sur ce phénomène, et une grande majorité des ouvrages de référence sur le sujet fut publiée avant 1930, en majorité par des Allemands, des Hollandais et des Français.

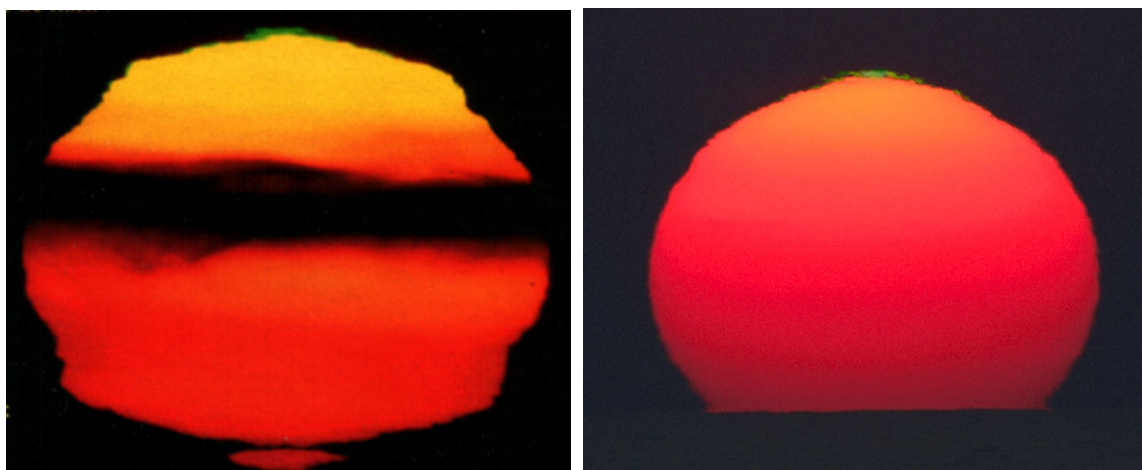
Le terme de rayon vert est cependant trompeur, car il incite à penser qu'il existe un phénomène unique, or il se traduit par deux manifestations distinctes. Pour être rigoureux, il faudrait parler des rayons verts et non du rayon vert.



a) Le béret vert (1) :

Lorsqu'il se couche sur l'horizon, le soleil se pare d'un croissant vert dans sa partie supérieure et d'un rouge dans sa partie inférieure (non vu). Lorsque le soleil a quasiment disparu sous l'horizon, il ne reste qu'un croissant vert, appelé «béret vert » (n°1 sur le schéma précédent).

Dans la réalité, le béret vert se traduit par les photos suivantes :

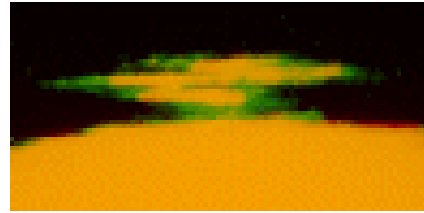
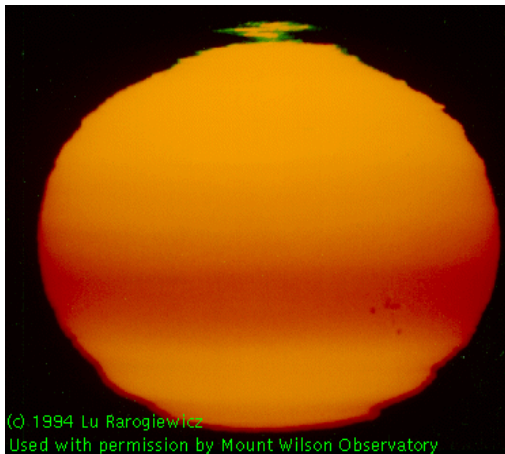


Observez avec soin la partie supérieure du Soleil : elle présente un segment ou un croissant vert qui sont la manifestation la moins spectaculaire du rayon vert : ce sont des exemples de "bérets verts".

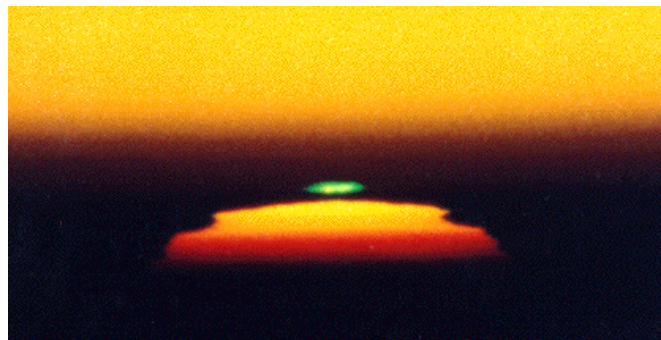
* « [Je remarquai qu'au] moment de la disparition du soleil sous l'horizon, le dernier aperçu est coloré d'un vert bleuté. [...] Juste au bord supérieur, là où les bandes du disque solaire sont séparées l'une par rapport à l'autre par la réfraction, chaque bande devient colorée [...] juste avant de disparaître. »

b) Le rayon vert proprement dit (2) :

C'est l'apparition d'un flash vert qui constitue la manifestation la plus remarquable du rayon vert ; cela se traduit par l'apparition d'une flammèche verte (n°2 sur le schéma précédent) qui semble jaillir de l'horizon au moment précis de la disparition du Soleil, comme ci-dessous.



La forme extrême du rayon vert à proprement parler est l'apparition d'un «spot» d'un vert très intense au-dessus du soleil et totalement détaché de ce dernier. La plus belle photo du rayon vert dont je dispose a été prise le 7 janvier 1996, depuis l'observatoire de Torrey Pines en Californie par l'astronome américain A.T. YOUNG :



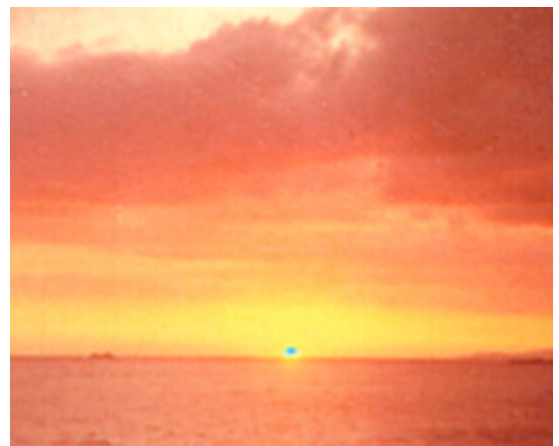
3. Comment observer les rayons verts ?

Contrairement à ce que l'on pourrait envisager de prime abord il ne s'agit pas là d'un phénomène de persistance rétinienne ; cette hypothèse est infirmée par les observations :

- Le rayon vert peut être observé au lever du Soleil avant que toute lumière n'ait imprégné la rétine (il reste cependant que la plupart des rayons verts sont observés lors de couchers de Soleil).
- Il n'apparaît que lorsque l'horizon est lointain : s'il résultait de la persistance rétinienne, on serait à même de l'observer lorsque le soleil se couche derrière de proches montagnes.

Pour espérer observer dans un premier temps le bérêt vert, il est nécessaire que plusieurs conditions soient réunies :

- un ciel bien clair ; si l'air est trop chargé en vapeur d'eau ou en poussières (ex : pollution), des phénomènes d'absorptions ne permettent le passage que de la lumière rouge.
- la présence d'un anticyclone c'est-à-dire une très haute pression.
- l'horizon doit être lointain afin que la quantité d'air traversée par la lumière avant d'atteindre l'œil de l'observateur soit maximale, l'idéal étant d'observer le Soleil se couchant sur la mer.



Cependant l'observation du rayon vert reste un phénomène rare, d'une part à cause des conditions particulières nécessaires à son observation, et d'une autre par sa brièveté, de l'ordre d'une ou deux secondes. En 1964, un astronome canadien a observé à deux reprises le rayon vert lors d'un voyage aérien au-dessus de l'Atlantique : l'avion a joué un moment à cache-cache avec le soleil derrière l'horizon, ce qui a permis plusieurs levers et couchers de soleil dans des conditions favorables au rayon vert. Dans les années trente, les membres de l'expédition Byrd au pôle Sud ont suivi, à bord de leur bateau, le soleil au ras de l'horizon : ils ont alors vu le rayon vert pendant trente-cinq minutes. D'autre part, à Hammerfest en Norvège, par 79° de latitude Nord, le rayon vert peut durer jusqu'à 14 minutes en plein cœur de l'été, 7 minutes au coucher, et 7 minutes au lever qui le suit immédiatement.

Même pour un observateur attentif il faut un peu de réussite et certains astronomes se livrent à une vraie traque pour rapporter des témoignages photographiques du phénomène. Il est donc très difficile de se procurer des photographies «spectaculaires» des rayons verts, et on trouve beaucoup plus facilement des photographies du bérêt vert. Un problème majeur réside dans le fait qu'il est impossible de reproduire les couleurs réelles des rayons verts avec précision sur n'importe quelle pellicule et il faut être conscient que les couleurs réelles des rayons verts sont beaucoup plus éclatantes que ne le montrent les photographies.

II. Le phénomène de réfraction atmosphérique

1. Variation de l'indice de l'air dans l'atmosphère

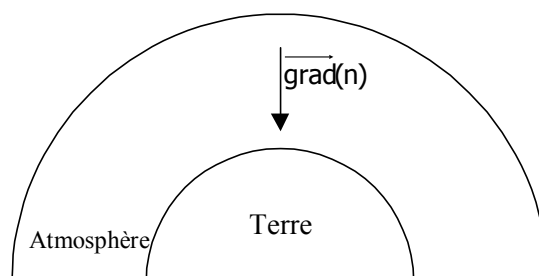
L'indice d'un milieu est le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide sur celle de la lumière dans le milieu. A titre d'exemple, l'indice de l'air est 1,0003 au niveau du sol.

A l'échelle de toute l'atmosphère, l'indice de l'air connaît de nombreuses variations. De façon générale, l'indice de l'air est proportionnel à sa densité, donc les facteurs influençant la densité de l'air ont des conséquences plus ou moins importantes au niveau optique.

a) La pression

Indépendamment des fluctuations dues aux variations de température, il existe une variation d'ensemble de la densité de l'air avec l'altitude, liée à la diminution de pression. En effet plus on s'élève en altitude, plus la pression diminue, donc plus la densité de l'air diminue. Le gradient d'indice qui en résulte est donc dirigé vers le bas, mais il est d'autant moins prononcé que l'altitude est plus élevée.

C'est cette variation d'indice sur toute l'épaisseur de l'atmosphère qui intervient dans l'explication de phénomène du rayon vert.



b) La température

Pour de multiples raisons qu'il est difficile d'appréhender à l'échelle de l'atmosphère (latitude, vents, reliefs, etc.), la température de l'air varie rapidement et aléatoirement, ce qui entraîne de modifications rapides de la densité de l'air et donc de son indice.

En effet, à pression fixée, et si on assimile l'air à un gaz parfait, l'équation d'état $pV=nRT$ montre qu'une variation de température entraîne une variation de volume, donc une variation de masse volumique, donc de densité. Ces variations rapides sont à l'origine de la scintillation des étoiles et n'ont un effet apparent que sur des sources de très petit diamètre.

Cette variation a donc un effet négligeable sur l'observation du Soleil, puisque les modifications de température aléatoires se compensent en moyenne lors de son observation.

Il peut aussi exister localement des variations de température entraînant un gradient d'indice vertical de faible étendue, de l'ordre de quelques mètres ou dizaines de mètres. Par exemple un sol (une route exposée au soleil) chaud crée un gradient de température dirigé verticalement vers le haut. Ce type de variation est la cause des mirages, qui selon certaines théories sur le rayon vert peuvent influencer son apparition (mais ils représenteraient plutôt un facteur facilitant son observation qu'une cause réelle de son apparition).

2. Trajectoire d'un rayon lumineux

Le principe de propagation rectiligne de la lumière n'est utilisable que dans un milieu homogène. Si l'indice de réfraction varie d'un point à un autre, les rayons lumineux s'infléchissent. Or on a vu au §1. que l'indice de l'air varie dans l'atmosphère, aussi on peut prévoir que cette propriété joue un rôle déterminant dans le phénomène du rayon vert.

On peut réaliser de façon théorique l'étude de la trajectoire d'un rayon lumineux dans un milieu dont l'indice varie continûment.

A partir de la loi fondamentale de l'optique géométrique :

$$\frac{d}{ds}(n\vec{u}) = \overrightarrow{\text{grad}}(n) \quad \begin{array}{l} \text{où } s \text{ est l'abscisse curviligne} \\ n \text{ l'indice du milieu} \\ \vec{u} \text{ le vecteur unitaire tangent à la trajectoire} \end{array}$$

on démontre par un calcul simple que l'équation du rayon lumineux dans le milieu non homogène

$$\text{est : } \frac{dn}{ds}\vec{u} + \frac{n}{R}\vec{e}_n = \overrightarrow{\text{grad}}(n)$$

Cette équation permet de trouver l'expression du rayon de courbure de la trajectoire du rayon lumineux lors de la traversée de l'atmosphère :

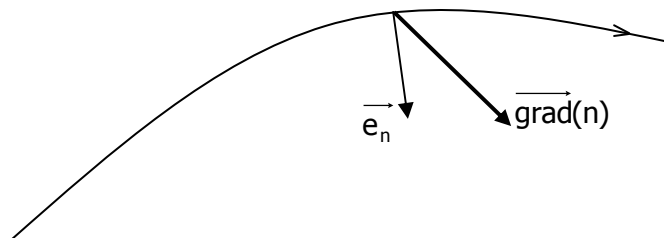
$$\boxed{\frac{1}{R} = \frac{1}{n}\vec{e}_n \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(n)}$$

Interprétons ce résultat :

$$R > 0 \text{ donc } \vec{e}_n \times \overrightarrow{\text{grad}}(n) > 0$$

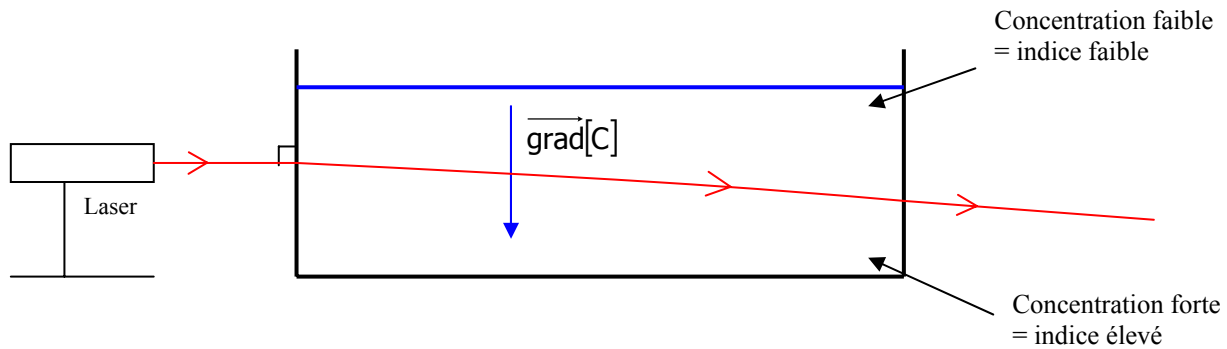
$$\text{donc } \cos(\vec{e}_n, \overrightarrow{\text{grad}}(n)) > 0 \text{ i.e. } (\vec{e}_n, \overrightarrow{\text{grad}}(n)) \text{ est toujours aigu}$$

$$\Rightarrow \text{la concavité de la trajectoire est tournée dans le sens de } \overrightarrow{\text{grad}}(n)$$



A petite échelle cette propriété se traduit de façon très simple. Il est facile de réaliser un gradient de concentration donc un gradient d'indice en utilisant l'eau à la place de l'air comme milieu. Dans une cuve, on superpose de l'eau saturée en sucre et de l'eau distillée. L'eau sucrée possède un indice plus élevé que l'eau distillée, et comme dans la zone de contact les deux eaux se mélangent, il se crée un gradient de concentration dirigé vers le bas (comme l'est le gradient d'indice de l'air dans l'atmosphère).

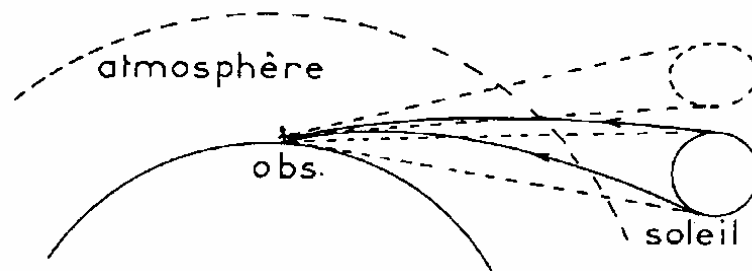
Un rayon lumineux (tel celui d'un laser par exemple) est dévié par la variation de l'indice de l'eau dans la cuve.



Cette propriété de déviation de la lumière par la variation continue de l'indice d'un milieu a donc une influence même à une petite échelle. A l'échelle autrement plus importante de l'atmosphère, même si la variation absolue d'indice est faible (de $n=1$ à $n=1,0003$ au sol) on peut penser que son rôle est primordial dans la compréhension de certains phénomènes d'optique atmosphérique, et en particulier dans l'apparition du rayon vert. Cette déviation se traduit en effet dans l'atmosphère par le phénomène de réfraction atmosphérique.

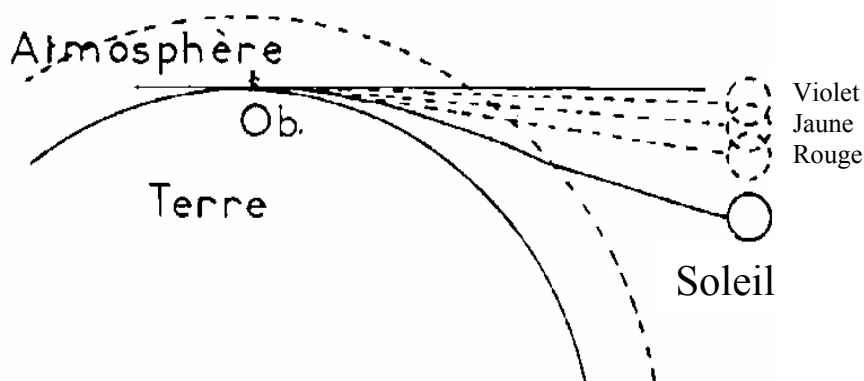
3. Réfraction atmosphérique

Au 1. on a vu que dans l'atmosphère il existe un gradient d'indice dirigé vers le bas ; puis au 2. on a montré que dans un milieu où l'indice varie continûment les rayons lumineux se courbent vers les zones de plus fort indice. Donc lorsqu'ils pénètrent dans l'atmosphère les rayons lumineux se courbent vers le sol et modifient la position apparente du soleil qui est donc relevé au-dessus de l'horizon.



Cependant la réfraction dépend de la longueur d'onde : elle est plus importante pour les faibles longueurs d'onde (violet - bleu) que pour les grandes longueurs d'onde (rouge) ; c'est pourquoi on observe un spectre quand on fait traverser un prisme à de la lumière blanche. Il se produit la même chose dans l'atmosphère.

Ces deux effets de la réfraction atmosphériques conduisent à décomposer le soleil en disques superposés de couleurs différentes, du bleu au rouge de haut en bas.



Ainsi lorsque le soleil se couche, les disques superposés sont cachés un à un à l'observateur et on observe alors le rayon vert.

On peut alors aisément comprendre pourquoi on n'observe le rayon vert que lorsque le soleil se couche ou lorsqu'il se lève : c'est en effet à cet instant que l'épaisseur d'air traversée est la plus importante et donc la déviation la plus prononcée. C'est aussi pour cette raison qu'un anticyclone favorise son observation : comme la présence d'un anticyclone entraîne de fortes pressions au niveau du sol, la variation d'indice est plus importante et donc la réfraction aussi.

III. Autres facteurs

Mais l'explication du rayon vert par la seule réfraction atmosphérique est insuffisante. En effet quand le soleil se couche, on ne voit plus que le bord supérieur du disque supérieur (celui qui résulte de la longueur d'onde la plus déviée), qui devrait être violet si on se contentait de l'explication par la réfraction atmosphérique. Mais si on se contente de cette explication, on ne considère que l'aspect géométrique de la lumière. On touche donc ici aux limites du modèle géométrique de la lumière.

Pourquoi voit-on en réalité un rayon vert, et non un rayon violet ou bleu ? Deux phénomènes physiques liés à l'aspect ondulatoire et corpusculaire de la lumière conduisent à l'élimination de certaines longueurs d'ondes qui dès lors ne parviennent pas à l'observateur : la diffusion et l'absorption.

1. La diffusion

Les défauts d'homogénéité d'un milieu provoquent une déviation de la lumière qui dépend de la répartition de ces défauts. Lorsque la distribution spatiale de ces variations locales de n est quelconque, le comportement de la lumière dans ce milieu ne peut être connu que par l'expérience. Si ces défauts sont nombreux et de petites dimensions par rapport à la dimension du milieu considéré, la lumière est éparpillée dans toutes les directions : on observe alors une diffusion.

Les propriétés optiques des milieux diffusants dépendent beaucoup de la répartition spatiale de cette hétérogénéité. Dans le cas de l'atmosphère, les gaz sont formés de particules (molécules) très petites devant la longueur d'onde, et donnent une diffusion faible, rapidement variable avec la longueur d'onde. C'est la diffusion de Rayleigh ; elle est sélective (car proportionnelle à λ^{-4}) : c'est à cette sélectivité qu'est due la couleur bleue du ciel. Les faibles longueurs d'onde sont les plus concernées par la diffusion : le violet et le bleu sont largement diffusés alors que le rouge ne l'est quasiment pas : c'est pour cette raison que le ciel est bleu.

Donc pratiquement aucun rayon bleu ou violet ne parviendra à l'œil de l'observateur qui cherche à observer le rayon vert (cf. 3.).

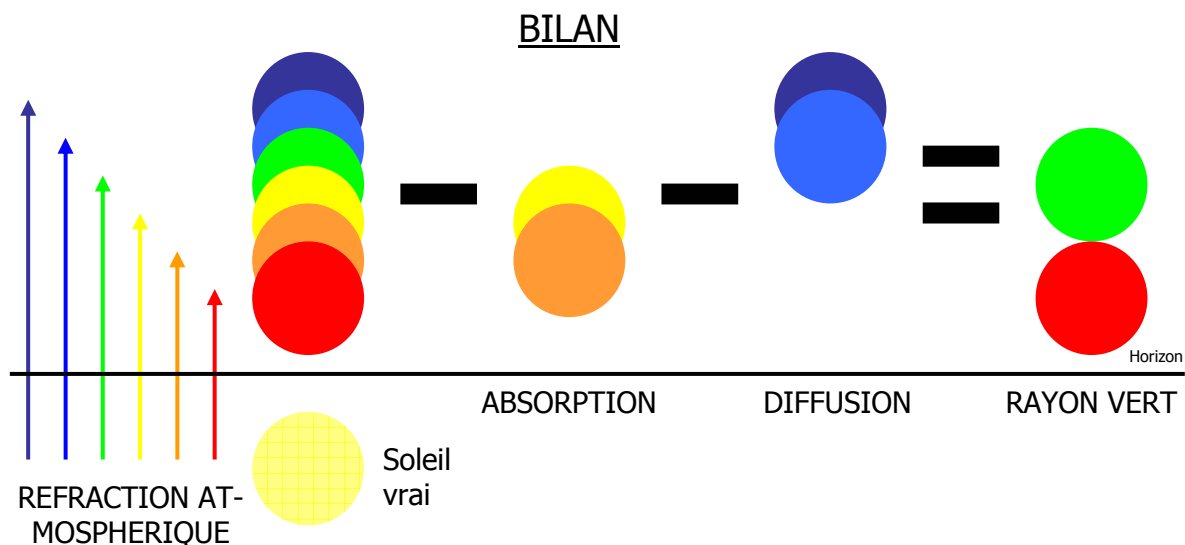
2. L'absorption

Dans tous les milieux optiques, l'essentiel des pertes de lumière (c'est-à-dire d'intensité lumineuse lors du cheminement lumineux) est dû à l'absorption. L'absorption est due soit à des changements d'état interne quantifiés des molécules ou des atomes, donnant lieu à des raies spectrales d'absorption, soit à une ionisation donnant lieu à une absorption continue.

Les problèmes d'absorption ont une importance particulière pour les observations à distance dans l'atmosphère. Il faut savoir que l'absorption dans l'atmosphère est beaucoup plus complexe que celle de l'atome d'hydrogène mais le modèle de l'atome d'hydrogène permet d'appréhender plus facilement le mécanisme de l'absorption des photons par les gaz.

La vapeur d'eau, l'ozone O_3 et le dioxyde de carbone CO_2 jouent un rôle prépondérant, même si l'absorption dans l'atmosphère se fait très peu dans le domaine visible (elle est énormément plus importante dans les domaines ultraviolet et infrarouge). L'important dans la compréhension du rayon vert est que dans le domaine du visible, l'atmosphère absorbe principalement le jaune et l'orange (cf. 3.).

3. Influences conjuguées de la diffusion et de l'absorption



Conclusion

Ainsi c'est la variation continue et verticale de l'indice de réfraction de l'atmosphère qui est à la base de l'apparition du rayon vert en contribuant à la séparation des couleurs du Soleil sur l'horizon. Les effets ajoutés de la diffusion et de l'absorption contribuent à l'élimination des couleurs violette, bleue, orange et jaune et ne laissent apparaître que le vert et le rouge superposés et suffisamment séparés pour qu'on puisse apercevoir le rayon vert.

J'ai cependant négligé les variations d'indice dues aux variations de température au niveau du sol et qui sont la cause des mirages : ces derniers, en modifiant la forme même du Soleil, peuvent représenter un facteur favorisant son observation. De plus certaines données physiologiques peuvent montrer pourquoi le vert paraît si intense : lors du coucher du soleil l'œil est saturé dans les couleurs rouges et jaunes alors que les bâtonnets permettant la perception du vert sont beaucoup plus sensibles et donc le vert apparaît plus intense à l'œil.

Il reste cependant la légende qui veut que, comme l'a écrit Jules Verne dans son roman Le Rayon vert, «celui qui verra le rayon vert verra clair dans son cœur, et dans celui des autres ».